

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Stanislav Vaněk



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**MĚŘENÍ SEISMICKÉ ČINNOSTI POMOCÍ OPTICKÝCH
VLÁKNOVÝCH SENZORŮ**

SEISMIC ACTIVITY MEASUREMENT USING FIBER OPTIC SENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Stanislav Vaněk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Josef Vojtěch, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Stanislav Vaněk

ID: 164431

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření seismické činnosti pomocí optických vláknových senzorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je teoretický rozbor problematiky měření seismických vln. Zaměření práce bude na využití optických vláknových senzorických systémů pro měření seismických vibrací. V rámci praktické části bude provedeno vyhodnocení a analýza dat získaných z optických senzorických systémů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, Miloslav. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] EDITED BY SHIZHUO YIN, PAUL B. RUFFIN a FRANCIS T.S. YU. Fiber optic sensors. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008. ISBN 1420053663.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Josef Vojtěch, Ph.D.

Konzultant: Ing. Petr Münster, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je seznámit se s problematikou měření a analýzy seismických vln. Teoretická část se nejprve věnuje popisu seismických vln, zejména jsou zmíněny jejich vlastnosti, typy a zdroje. Poté je pozornost upřena na systémy měření těchto vln, důraz byl kladen především na jejich principy a výhody. V praktické části je probrána problematika metod redukce šumu a zvýraznění významných událostí v měřených datech. Na závěr jsou jednotlivé metody implementovány do uživatelsky přívětivého grafického rozhraní.

KLÍČOVÁ SLOVA

Seismická vlna, zemětřesení, optický reflektometr, Rayleighův rozptyl, distribuovaný akustický senzor, Braggova mřížka, segmentace dat, impulzní charakteristika, plovoucí průměr, stejnosměrná složka, pásmová propust, pomalé změny, hodnocení polynomu

ABSTRACT

The aim of master's thesis is to get familiarized with the problems of measurement and analysis of seismic waves. Theoretical part deals with the description of seismic waves, especially their types, sources and properties. Attention was afterwards focused on the measurement systems of these waves, emphasis was placed on their principles and advantages. The practical part discusses methods of noise reduction and highlighting of significant events in measured data. At the end, individual methods are implemented into user-friendly graphical interface.

KEYWORDS

Seismic wave, earthquake, optical reflectometry, Rayleigh scattering, distributed acoustic sensor, Bragg grating, data segmentation, impulse characteristic, moving mean, DC component, band pass, slow changes, polynomial evaluation

VANĚK, Stanislav. *Měření a analýza seismických vln*. Brno, Rok, 60 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Josef Vojtěch, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Měření a analýza seismických vln“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému konzultantovi diplomové práce panu Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	12
1 Seismická vlna	13
1.1 Typy seismických vln	13
1.1.1 Vlny objemové	14
1.1.2 Vlny povrchové	15
1.2 Zdroje seismických vln	15
1.2.1 Přírodní generátory	16
1.2.2 Umělé zdroje	17
1.3 Seismická aktivita v České republice	17
1.3.1 Seismické oblasti České republiky	17
2 Měření seismických vln	19
2.1 Optický reflektometr časové oblasti (OTDR)	19
2.1.1 Fázový optický reflektometr (Φ -OTDR)	21
2.2 Distribuovaný akustický senzor - DAS	23
2.2.1 Inteligentní distribuovaný akustický senzor (iDAS)	23
2.3 Snímač FBG	26
2.4 Snímač SOFO	28
3 Výsledky studentské práce	30
3.1 Popis zapojení pro měření seismických vln	30
3.2 Náměry	31
3.2.1 Souborový formát CSV	32
3.2.2 Binární soubor	34
3.3 Segmentace náměrů	35
3.3.1 Impulzní charakteristika	38
3.4 Metody pro redukci šumu	40
3.4.1 Metoda založená na plovoucím průměru	40
3.4.2 Odstranění stejnosměrné složky	43
3.4.3 Filtrování pásmovou propustí	45
3.4.4 Filtrace špiček	47
3.4.5 Eliminace pomalých změn	49
3.4.6 Hodnocení polynomu	50
3.5 Grafické uživatelské rozhraní - GUI	52
4 Závěr	55

Literatura	57
Seznam symbolů, veličin a zkratk	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Vlna podélná [11], [13]	14
1.2	Vlna příčná [11], [13]	14
1.3	Rayleighova vlna [11], [13]	15
1.4	Loveova vlna [11], [13]	16
1.5	Oblasti zemětřesení v České republice	18
2.1	Zjednodušené schéma systému OTDR [15], [1]	20
2.2	Zapojení modelu systému Φ -OTDR [15]	21
2.3	Schéma Φ -OTDR založené na koherentní detekci [7], [15]	22
2.4	Princip systému iDAS	24
2.5	Příklady polí tvořených kabelem s jedním vláknem [5], [9]	26
2.6	Princip snímače FBG [19]	27
2.7	Princip systému SOFO [4]	29
3.1	Zapojení senzorického systému DAS	30
3.2	Panel pro připojení externích komponent	31
3.3	Náměry ve formátu CSV	32
3.4	Načtená data	33
3.5	Přibližné náměry	33
3.6	Načtená data z binárního souboru	34
3.7	Načtená data z binárního souboru	35
3.8	Segmentovaná data	36
3.9	Detekování náběžných hran světelného pulzu	37
3.10	Repetice seřazené pod sebe do matice	37
3.11	Impulzní charakteristika jedné repetice	38
3.12	Vzorek odpovídající konci vlákna	39
3.13	Náměry převedeny na vzdálenost	39
3.14	Princip plovoucího průměru	41
3.15	Plovoucí průměr pro délku okna 100 prvků	41
3.16	Plovoucí průměr pro délku okna 5000 prvků	42
3.17	Odečtení náměrů od plovoucího průměru	42
3.18	Odečtení náměrů od plovoucího průměru	43
3.19	Odstranění stejnosměrné složky	44
3.20	Odstranění stejnosměrné složky	45
3.21	Bandpass filter	46
3.22	Bandpass filter	46
3.23	Filtrace špiček	47
3.24	Impulzní charakteristika filtru špiček	48
3.25	Filtrace špiček	48

3.26	Filtr pomalých změn	49
3.27	Filtr pomalých změn	50
3.28	Polynomický filtr	51
3.29	Polynomický filtr	51
3.30	Grafické uživatelské rozhraní	52
3.31	Export GUI do PDF	54
3.32	Náměry převedeny na vzdálenost	54

SEZNAM TABULEK

1.1	Přehled rychlosti šíření seismických vln v různých materiálech [13]	13
-----	---	----

ÚVOD

Povrch Země je v neustálém pohybu. Tento mírný pohyb vzniká v důsledku jak místních účinků, jako je houpání stromů vyvolané působením větru, rušení způsobené člověkem či vzdálenými vibracemi, mezi které patří např. mikroseismy vyvolané účinkem dalekých oceánských bouří. Nejznámějším přírodním generátorem seismických vln je zemětřesení, jež vzniká pohybem litosférických desek. Při tomto pohybu je uvolněno obrovské množství nashromážděné energie, které z hlediska počtu obětí a materiálních škod řadí zemětřesení mezi jedno z největších přírodních rizik.

Pro minimalizaci ztrát na životech a škod je žádoucí co možná nejefektivnější predikce veškerých seismických rizik. V praxi jsou užívány různé systémy pro měření seismické aktivity. Pomocí systémů lze měřit namáhání optických vláken, což může indikovat seismickou aktivitu. Systémy pro měření seismických vln našly plné využití nejen pro určení blížícího se nebezpečí, ale v současné době jsou hojně používány v oblastech průmyslu např. měření vlastností různorodých staveb jako jsou mosty, tunely, mrakodrapy. Zasluhou těchto systémů bylo možné předejít již několika katastrofám a zachránit tak mnoho lidských životů.

Tato práce se věnuje problematice měření a analýzy seismických vln se zaměřením na redukci šumu a zvýraznění významných událostí. Teoretická část se zabývá typy a zdroji seismického vlnění. Následně jsou popsány metody pro měření seismických vln s důrazem kladeným na fázový optický reflektometr a distribuované akustické snímání. Výsledkem diplomové práce je realizace metod pro filtrování šumu z náměrů a zvýraznění významných událostí. Na závěr jsou navržené metody implementovány do uživatelsky přívětivého grafického rozhraní.

1 SEISMICKÁ VLNA

Vlněním nazýváme kmitání, jež se šíří prostorem v čase a je zároveň doprovázeno přenosem energie. V případě, že k tomuto přenosu energie dojde na povrchu, nebo uvnitř zemského tělesa, jsou generovány tzv. seismické vlny.

Tyto seismické vlny mohou být charakterizovány amplitudou a , frekvencí f , seismickou rychlostí v a vlnovou délkou λ . Amplitudou a je myšlena maximální výchylka částice z rovnovážné polohy, frekvence f udává v Hz počet maximálních výchylek částic vlny, které projdou určitým místem za jednu sekundu. Seismickou rychlost v představuje rychlost šíření vlny daným prostředím [10], [11], [13]. Tato rychlost je definována vztahem:

$$v = f \times \lambda \quad (1.1)$$

Avšak tato rychlost není konstantní, nýbrž je ovlivněna především hustotou materiálu, kterým vlna prochází. Platí, že se rychlost šíření seismických vln zvětšuje s rostoucí hustotou materiálu.

Tab. 1.1: Přehled rychlosti šíření seismických vln v různých materiálech [13]

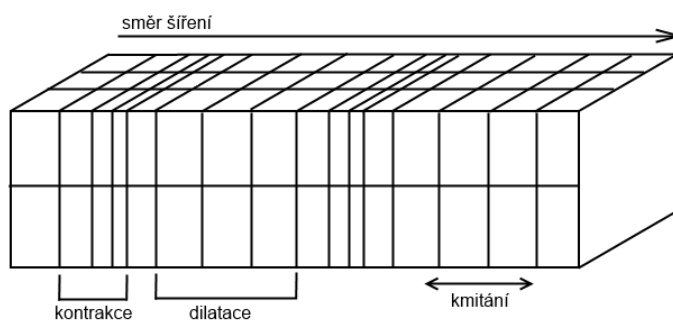
Prostředí	Rychlost v [$m \cdot s^{-1}$]
Vzduch	310 – 360
Suchý písek, štěrk	150 – 600
Suchý jíl	300 – 900
Mokrý písek	600 – 1300
Voda	1430 – 1590
Pískovec	1500 – 4500
Vápenec	2600 – 6500
Žula	4000 – 6000
Kamenná sůl	4500 – 6000

1.1 Typy seismických vln

Seismické vlny jsou rozděleny na dva základní druhy, a to dle místa šíření. Vlny šířící se zemským tělesem, jsou nazývány jako objemové. Vlny, které se šíří pouze v blízkosti zemského povrchu či na něm, jsou vlny povrchové.

1.1.1 Vlny objemové

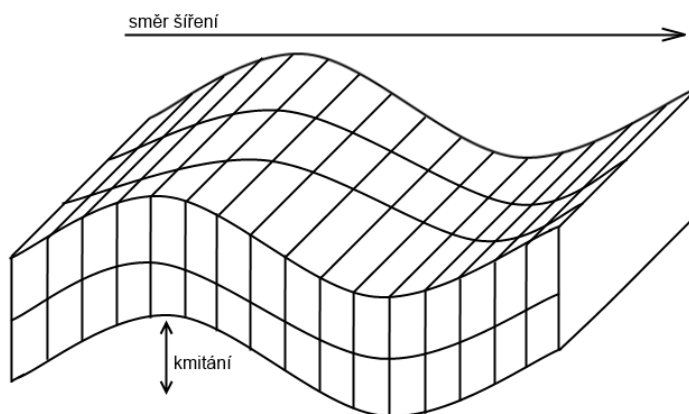
Objemové vlny jsou dvojího typu v závislosti na směru kmitání jednotlivých částic ke směru šíření vlnění. Prvním typem jsou vlny podélné, někdy též nazývány jako P-vlny (primární). Podélné vlnění je charakterizováno periodickým ředěním a zhušťováním částic, kdy každá z těchto částic kmitá ve směru šíření vlny. Tento typ se může šířit ve všech typech prostředí, tudíž pevném, kapalném i plynném [10], [13].



Obr. 1.1: Vlna podélná [11], [13]

U podélných vln, podobně jako u šíření zvuku ve vzduchu, nejprve dochází ke stlačení částic (kontrakce), a poté k jejich roztažení (dilatace). Ve srovnání se všemi ostatními druhy vln, mají P-vlny největší rychlost, avšak navzdory tomuto předpokladu působí minimální škody [13].

Seismické vlny, u kterých jednotlivé částice nekmitají shodně se směrem šíření, nýbrž kolmo, bývají označovány jako vlny příčné, někdy nazývány též jako S-vlny (sekundární). Tento typ se, na rozdíl od vln podélných, vyskytuje pouze v prostředí pevném [17].



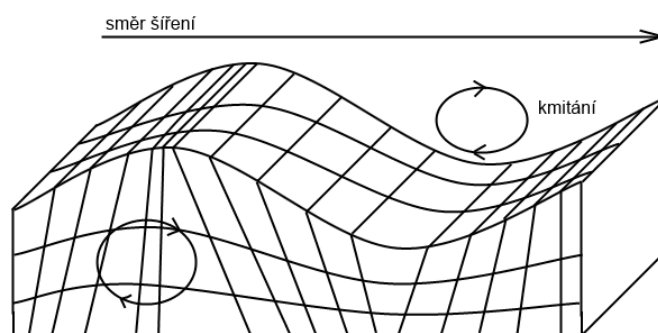
Obr. 1.2: Vlna příčná [11], [13]

S-vlny sice dosahují pouze poloviční rychlosti vln podélných, nicméně při jejich působení se zemský povrch fyzicky pohybuje, což se případně může projevit ničením budov, či celých měst [17].

1.1.2 Vlny povrchové

Jak již bylo výše uvedeno, povrchové vlny se šíří pouze v blízkosti zemského povrchu, případně přímo na něm. I tyto vlny jsou dále rozlišovány na dva druhy, a to na Rayleighovy vlny a vlny Loveovy. Oba tyto typy se vyznačují tím, že mají amplitudu největší na povrchu a směrem do podloží se tato amplituda rapidně snižuje. Avšak frekvence se s rostoucí hloubkou nemění [12].

U vln Rayleigha kmitají jednotlivé částice po vertikální trajektorii připomínající elipsu. V porovnání s Loveovými vlnami jsou pomalejší.



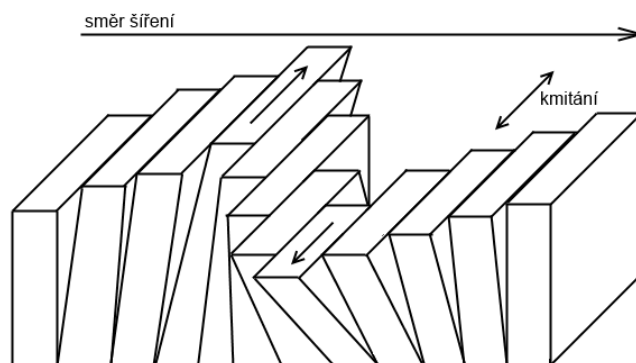
Obr. 1.3: Rayleighova vlna [11], [13]

Naopak u Loveovy vlny, někdy též označovány jako Q-vlna, jednotlivé částice vykonávají kmitavý pohyb směrem kolmým ke směru šíření vlny, a to v horizontální rovině.

Povrchové vlny v porovnání s vlnami primárními a sekundárními jsou výrazně pomalejší, nicméně vzhledem k maximální amplitudě u zemského povrchu, působí nejvíce škod, a proto představují největší riziko [13].

1.2 Zdroje seismických vln

Zdroje, které generují seismické vlny, lze rozdělit do dvou hlavních odvětví, a to sice přírodní generátory a umělé zdroje. Přírodní generátory, jak již název napovídá, jsou takovým zdrojem seismického vlnění, kdy jsou vlny samotné vyvolány přírodními vlivy. Naopak umělý zdroj představuje seismické vlny podmíněné člověkem.



Obr. 1.4: Loveova vlna [11], [13]

1.2.1 Přírodní generátory

Nejběžnějším přírodním generátorem seismických vln je zemětřesení. To vzniká při náhlém uvolnění energie nashromážděné v zemském tělese, např. při pohybu litosférických desek [16]. Zemětřesení lze rozdělit z mnoha různých hledisek, jedna ze základních klasifikací je dělení podle způsobu vzniku otřesů. Dle tohoto kritéria se rozlišuje zemětřesení:

- Tektonické – nejnebezpečnější a zároveň nejčastěji se vyskytující zemětřesení vůbec. Vznikají díky poruchám v litosféře (zlomům), kde dochází k náhlým procesům, při kterých se uvolňuje značné množství energie. V zemském tělese představují až 90% všech otřesů [17].
- Říťivé – nejméně častý druh zemětřesení. Vzniká propadáním stropů podzemních prostor. Tyto prostory mohou být přírodního původu (jeskyně), nebo výtvořem člověka (různé štoly, doly). Tato zemětřesení zastupují 3% všech otřesů v zemské kůře [17], [13].
- Vulkanické – tento typ zemětřesení se zpravidla vyskytuje u sopečných erupcí, které doprovází nebo předchází. Otřesy se zřídka objeví samotné, většinou se jedná o celé skupiny otřesů (zemětřesné roje). Zemětřesení vulkanického typu představují 7% otřesů v zemské kůře [16], [17].

Zemětřesení mohou být dělena i podle oblasti vzniku, a to na podmořská a kontinentální. Podmořská jsou hlavní příčinou vzniku vln tsunami. Kontinentální zemětřesení naopak působí okamžité škody a ztráty na životech.

V rozsahu 0,001Hz - 4Hz mohou být účinky zemětřesení detekovány ve značném rozsahu od zdroje. Pro největší zemětřesení jsou nejlépe pozorovatelné vlny, které mnohokrát oběhly celou Zemi [18].

1.2.2 Umělé zdroje

Většina umělých zdrojů, jako jsou povrchové vibrátory, přístroje s poklesem hmotnosti, či chemické výbuchy nemají zdaleka takový rozsah, aby mohly být detekovány na větší části planety. Například účinky jednoho povrchového vibrátoru lze detekovat jen do vzdálenosti 2km. Na druhou stranu výbuch několika tun trhavin TNT lze pozorovat až ve vzdálenosti 1000km. Ovšem i tato vzdálenost je minimální ve srovnání s většími zemětřeseními. V současné době se zemětřesení, co se týče generování seismických vln pozorovatelných pro značnou část zemského povrchu, vyrovnávají pouze velké jaderné výbuchy.

1.3 Seismická aktivita v České republice

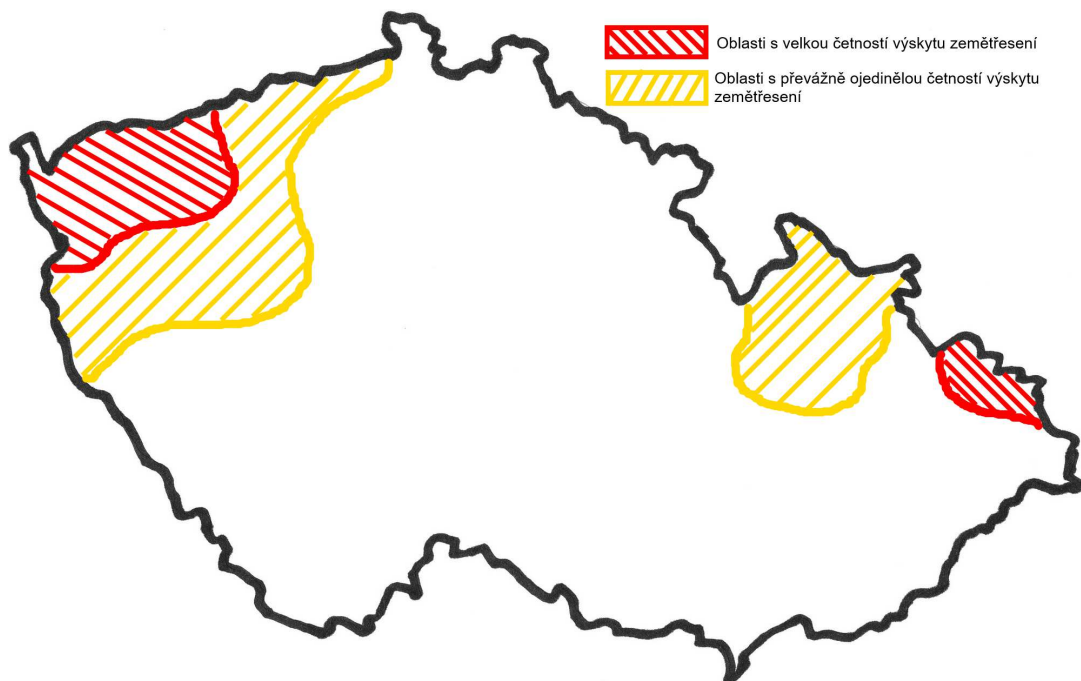
Ze seismologického hlediska leží území České republiky v poměrně klidné oblasti, jinými slovy se tato země nenachází v oblasti styku dvou litosférických desek, či v oblasti se zvýšenou vulkanickou činností. Nehrozí zde žádná obrovská zemětřesení, která by postihovala rozsáhlé plochy. Nicméně je nutné zdůraznit, že území České republiky není úplně neaktivní. Zemětřesení v České republice bývají zpravidla původu tektonického. Avšak většinou se jedná o zemětřesení mělká s hloubkou ohnisek 5 – 12km [14], [21].

1.3.1 Seismické oblasti České republiky

Oblast České republiky leží na rozhraní mezi dvěma oblastmi, a to mezi tzv. hercýnskou Evropou a oblastí Západních Karpat. První ze jmenovaných je geologicky starší a stabilní, patří zde Český masiv. Na druhou stranu oblast Západních Karpat je velmi aktivní, v porovnání s Českým masivem se vyznačuje podstatně vyšší a intenzivnější zemětřesnou aktivitou [14]. Oblasti s nejčastěji se vyskytující seismickou aktivitou na území České republiky jsou následující:

- Západní Čechy (Kraslicko) – oblast s největší seismickou aktivitou na území České republiky. V četném množství se zde vyskytují zemětřesné roje. Důvodem této seismické aktivity jsou hluboké zlomové poruchy (krušnohorský a mariánskolázeňský zlom). Právě aktivity kolem krušnohorského zlomu daly vzniknout zlomovému svahu Krušných hor. Na seismické činnosti mají vlivy i tamní sopky (Komorní hůrka). Tato oblast je velmi aktivní jak z tektonického, tak z vulkanického hlediska, o čemž svědčí postvulkanické projevy, které mají podobu značného množství vřídél a minerálních pramenů [14], [21].
- Český les, Krušné hory – v těchto lokalitách jsou zemětřesná ohniska spojována především s krušnohorským a tachovským zlomem.

- Morava, Slezsko – aktivita především v severovýchodní části tohoto území, obzvláště díky zlatohorsko-krnovskému zlomu. V důsledku hlubinné těžby černého uhlí je celé okolí Ostravy poddolováno, stejně tak okolí přilehlých polských měst Katowic a Krakówa. Na tomto území je občasný výskyt důlních otřesů a říťivých zemětřesení [14], [21].



Obr. 1.5: Oblasti zemětřesení v České republice

2 MĚŘENÍ SEISMICKÝCH VLN

Obecně existují dvě skupiny senzorů optických vláken, a to senzory bodové a distribuované. První ze jmenovaných měří pouze umístění měniče. Bodové snímače pro optické vlákno používají kabel k přenášení světla na převodník a z převodníku na čtecí jednotku. Zpravidla jsou tyto snímače multiplexovány takovým způsobem, že celá řada měničů užívá totožné vlákno pro přenos signálu do čtecí jednotky i z ní. Bodové senzory bývají použity tam, kde jsou kladeny nároky na rychlost měření [1].

Na druhé straně s distribuovanými senzory je optické vlákno samo o sobě snímačem, tudíž v optické dráze nejsou potřeba žádné další převodníky. Čtecí jednotka pracuje podobně jako radar. Do vlákna je vysílána řada pulsů a proti času je zaznamenáváno zpětně odražené světlo. Na tomto principu distribuovaný senzor měří ve všech bodech vlákna. Optické vlákno bývá často standardní telekomunikační vlákno, tedy může být nainstalováno do existujícího kabelu (např. telekomunikační kabel), který bývá využíván jiným bodovým snímačem. Distribuovaný snímač je hojně používán u měření, ve kterých jsou kladeny nároky na rozsáhlé pokrytí.

2.1 Optický reflektometr časové oblasti (OTDR)

Rayleighův rozptyl v optickém vlákně

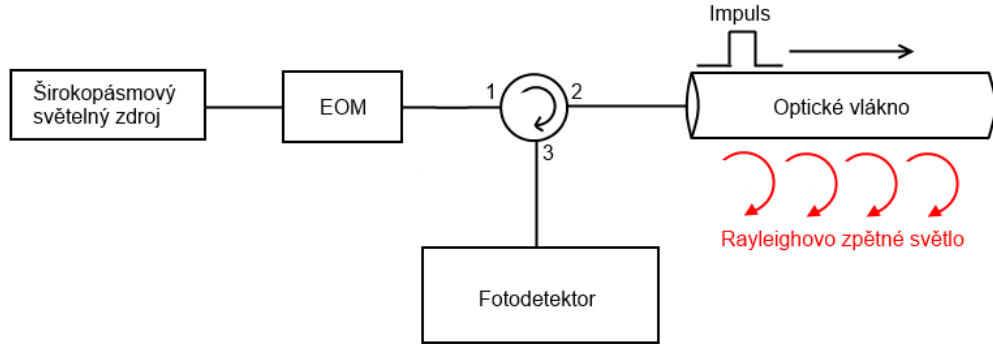
Nejdůležitějším faktorem k určení přenosových ztrát v optickém vlákně je Rayleighův rozptyl. Tento rozptyl je způsoben především nehomogenitou vláknového média, poněvadž náhodné uspořádání molekul vyvolává lokalizované změny hustoty, a tedy fluktuace indexu lomu. Rayleighův rozptyl je v podstatě pružným rozptylem, kdy frekvence rozptýleného světla je shodná s dopadajícím světlem. Pro představu, v oxidu křemičitém je Rayleighův rozptyl způsoben kolísáním hustoty během tuhnutí silikagelu ve výrobním procesu. To má za následek změnu indexu lomu podél vlákna [12], [6]. Koeficient ztrát optického vlákna způsoben Rayleighovým rozptylem je pak dán vztahem [1], [7]:

$$\alpha_s = \frac{C}{\lambda^4}, \quad (2.1.1)$$

kde C je v rozmezí $0,7 - 0,9 \text{ dB}/(\text{km} - \mu\text{m}^4)$ v závislosti na složení jádra vlákna a α představuje celkový útlumový koeficient $[\text{km}^{-1}]$. Rayleighův rozptyl a absorpce materiálu jsou dva způsoby, díky kterým dochází ke ztrátám v optických vláknech. Například pro vlnovou délku 1550nm , která má běžné využití v optické komunikaci, je ve standardním vlákně s jednoduchým režimem koeficient útlumu $0,2\text{dB}/\text{km}$. V závislosti na této vlnové délce je koeficient rozptylu $0,12 - 0,16\text{dB}/\text{km}$. Z toho vyplývá, že v blízkosti této vlnové délky je Rayleighův rozptyl dominantní ztrátou. Díky tomu lze odhadnout útlum vlákna sledováním právě Rayleighova rozptylu [1] [15].

Princip OTDR

Zjednodušené nastavení OTDR je zobrazeno na Obr. 2.1. Jako zdroj laseru využívá systém OTDR širokopásmový světelný zdroj modulovaný pomocí externího elektrooptického modulátoru (EOM). Tento modulátor se používá pro generování optických impulsů. Následně jsou tyto impulsy vysílány do snímacího vlákna. Rayleighovo zpětné světlo je pak detekováno pomocí fotodetektoru [12]. Nutno podotknout, že vzhledem ke vzdálenosti vlákna klesá výkon exponenciálně (lineárně v dB).



Obr. 2.1: Zjednodušené schéma systému OTDR [15], [1]

Aby nedošlo k superpozici zpětně rozptýlených signálů, je do vlákna vysílán pouze jediný impuls. Z toho vyplývá omezení rychlosti optického impulsu délkou vlákna. Pro časové zpoždění mezi impulsy platí vztah [1]:

$$\tau = \frac{2L}{v_g}, \quad (2.1.2)$$

kde L značí vzdálenost vstupu, v_g je pak skupinová rychlost světla šířícího se v optickém vlákne.

Prostorové rozlišení a dynamický rozsah

U systému OTDR je výkon celého systému charakterizován dvěma parametry, a to prostorovým rozlišením a dynamickým rozsahem. První jmenované představuje minimální rozlišitelnou vzdálenost, kterou určuje šířka spuštěného pulsu. Prostorové rozlišení je tedy definováno jako [1], [7]:

$$\Delta z = \frac{T_p v_g}{2}, \quad (2.1.3)$$

kde T_p je šířka pulsu dopadajícího světla. Dynamický rozsah je definován jako rozdíl mezi počáteční úrovní zpětného odrazu a hladinou šumu v době měření. Existují dva způsoby jak dosáhnout většího dynamického rozsahu. První variantou je

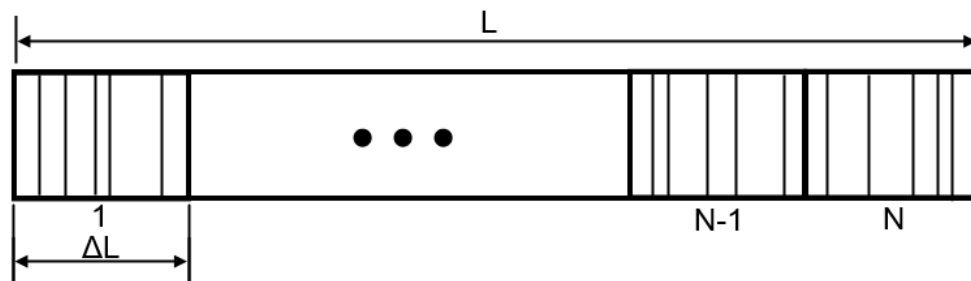
zvýšení výkonu, druhou pak snížení úrovně šumu. Nicméně pro systém OTDR není impuls s velmi vysokým výkonem žádoucí, poněvadž způsobuje nelinearitu ve vlákne. Dynamický rozsah tedy závisí především na šířce impulsu. Zvýšení tohoto rozsahu vyžaduje delší impulsy, což ovšem vede ke snížení prostorového rozlišení, jak je definováno ve výše uvedeném vztahu (2.1.3). Je tedy zapotřebí nalézt kompromis mezi prostorovým rozlišením a dynamickým rozsahem [7]. Oba tyto parametry musí být zvaženy v návrhu systému OTDR pro různé aplikace.

2.1.1 Fázový optický reflektometr (Φ -OTDR)

Technologie Φ -OTDR je velmi podobná samotnému OTDR, jediný rozdíl, avšak zásadní, je v laserovém zdroji. U fázového optického reflektometru je laserovým zdrojem úzký laserový paprsek, jehož koherentní délka je mnohem delší než délka vlákna. Princip Φ -OTDR je znázorněn na zjednodušeném simulačním modelu na Obr. 2.2. Využívá se skutečnosti, že Rayleighovo zpětné světlo může být modelováno jako posloupnost center rozptylů. Tyto středy mohou být znázorněny jako více reflektorů se slabým odrazem [15]. Využívá se poznatku, že vlákno o délce L lze rozdělit do N malých úseků, přičemž délka pro každý úsek je dána vztahem [1]:

$$\Delta L = \frac{L}{N} \quad (2.2.1)$$

V každém úseku vlákna se vyskytují tzv. centra rozptylů, která jsou náhodně, ale rovnoměrně rozdělena po celé sekci vlákna. Intenzita detekovaného signálu se vztahuje k fázím odraženého světla, které pochází právě z různých center rozptylů v šířce pulsu. Vzhledem k náhodnému rozdělení center mají vzorky Φ -OTDR náhodné oscilační rysy. Tento jev platí, pokud neprochází celé vlákno nějakými změnami. Jakmile dojde k jakémukoli rušení v určitém místě, změní se fáze zpětně rozptýleného světla a vzorky se v tomto místě budou lišit od zbytku vzorků v celém vlákne. Detekce místa rušení tedy závisí na sledování rozdílů jednotlivých vzorků [15].



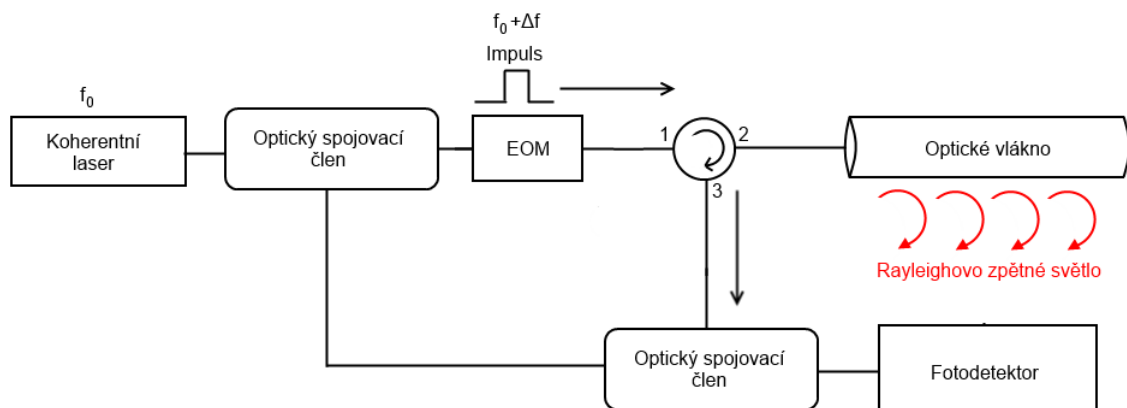
Obr. 2.2: Zapojení modelu systému Φ -OTDR [15]

Detekční metody Φ -OTDR – Přímá detekce

Schéma a princip činnosti Φ -OTDR s přímou detekcí jsou popsány v předchozí části. Technologie pro přímou detekci nepředstavuje vysokou složitost, jelikož je signál detekován přímo v časové oblasti. Tohoto poznatku se velmi hojně využívá pro měření s krátkým dosahem, kde je zpětné rozptylové světlo dostatečně silné. Na druhou stranu tento způsob detekce má spoustu nevýhod, například existuje několik zdrojů šumů, jako je laserový fázový šum či vnitřní šum způsobený poměrem konečného zastavení optického pulsu. Pro správnou funkci této technologie je nezbytnou součástí vysoký koherentní laser a laser se stabilní frekvencí po dobu měření [7], [15].

Koherentní detekce

Rayleighův zpětný rozptyl bývá při delších trasách velmi slabý. Toho lze využít k výraznému zvýšení citlivosti detekovaného signálu a poměru signálu k šumu. Princip koherentní detekce spočívá ve vzájemném promíchání optického signálu s lokálním oscilátorem, a to ještě předtím, než se optický signál dostane k fotodetektoru. Schéma takového zapojení je na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Schéma Φ -OTDR založené na koherentní detekci [7], [15]

Z laseru vychází světlo o frekvenci f_0 , které je bezprostředně po vygenerování rozděleno optickým spojovacím členem na dvě části. První část je využita jako lokální oscilátor. Druhá část slouží ke generování zpětného rozptýleného signálu. Při koherentní detekci je před odesláním pulsů do vlákna posunuta jejich frekvence do frekvence Δf . Nyní se detekovaný signál stává interferencí mezi lokálním oscilátorem a Rayleighovým zpětným rozptylem. Optická amplituda signálu lokálního oscilátoru bývá obvykle daleko vyšší než amplituda optického signálu. Díky tomu je intenzita rušivého signálu u metody koherentní detekce několikanásobně vyšší, než u metody přímé detekce [15]. Avšak je-li optická amplituda lokálního oscilátoru dostatečně vysoká, lze dosáhnout snížení šumu i u slabých signálů, což není u přímé detekce

proveditelné. Pro detekci velmi slabých signálů je tedy koherentní detekce vhodným nástrojem. Mezi hlavní nevýhody této metody se řadí nestabilita vzorků fázového reflektometru a výskyt většího množství šumu. Oproti přímé detekci je koherentní detekce mnohem citlivější na fázový šum a také silně závislá na polaritě obou částí signálu. Problém s polaritou byl částečně vyřešen použitím polarizačních vláken, nicméně toto řešení je velmi nákladné [1], [15].

2.2 Distribuovaný akustický senzor - DAS

Jako nejlepší technologické řešení snímače se jeví kompromis mezi bodovým a distribuovaným snímačem, kdy jsou využity jen žádoucí vlastnosti z obou snímačů. Tímto způsobem byl vynalezen nový snímač, který dosahuje přesnosti bodového snímače s rozsáhlým pokrytím distribuovaného snímače. Tento nový typ senzoru dokáže měřit skutečný akustický signál (amplitudu, frekvenci, fázi) v každém bodě podél optického vlákna [5].

Jako distribuované akustické snímače (DAS) je popsána celá řada systémů, jelikož neexistuje žádná obecná architektura DAS systému, na rozdíl třeba od snímačů OTDR. Z toho vyplývají poměrně velké rozdíly v základní konstrukci pro jednotlivé systémy, což se také projevuje na výkonech těchto systémů. V praxi se pro měření seismických signálů hojně využívá technologie iDAS (inteligentní distribuovaný akustický senzor), pomocí již technologie lze k přesnému uložení opakujících se signálů použít celé akustické pole s takovou přesností, že je možné seismické zobrazování [9].

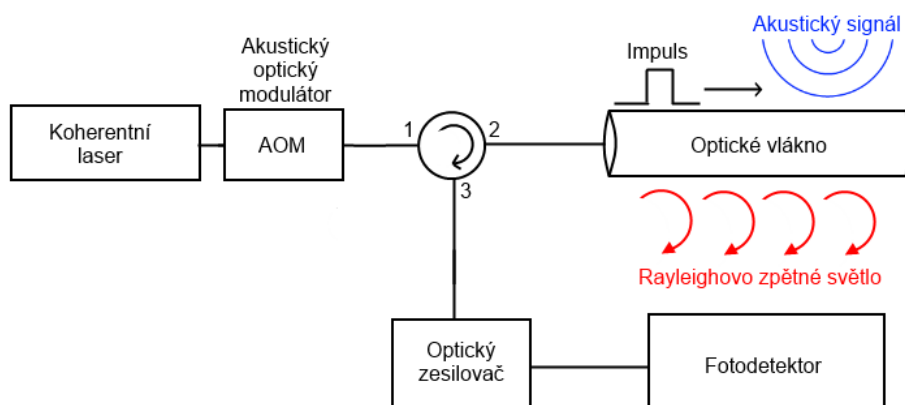
2.2.1 Inteligentní distribuovaný akustický senzor (iDAS)

Měřicí systémy s iDAS využívají podobný podkladový princip jako OTDR a DTS. Zde se do optického vlákna přenáší puls světla a rozptýlením do skla se malé množství dopadajícího světla rozptýlí zpět do snímací jednotky. Avšak iDAS je z tohoto rozptýleného světla schopen určit složku, která indikuje změny v lokálním axiálním namáhání podél vlákna. Navíc je nahráván čas příchodu navraceného světla, díky čemuž dokáže iDAS určit polohu, v níž byla generována každá část zpětného světla. Zpětné světlo je generováno po celou délku vlákna, což umožňuje systému iDAS vytvořit profil tohoto světla, a tedy dynamický profil deformace celého vlákna [5], [9].

Přesnost snímání signálu

Technicky nejnáročnějším aspektem technologie iDAS je přesnost, a to sice schopnost přesně zaznamenávat akustický signál, namísto záznamu pouhé aproximace

signálu. Tuto přesnost lze určit za pomoci vystavení části vlákna již známému signálu, nejvhodnější se jeví sinusová vlna. K výpočtu harmonického zkreslení se taktéž užívá akustický signál společně s FFT téhož signálu. Při srovnání s konvenčními snímači vyšlo najevo, že harmonické zkreslení není limitováno snímacími mechanismy iDAS, nýbrž především akustickým zdrojem. Inteligentní distribuovaný akustický snímač má navrženo optické uspořádání tak, aby mezi jednotlivými snímacími kanály nebylo možné vykazovat žádné měřitelné přeslechy, což je především při měření seismických vln velmi žádoucí [3], [9].



Obr. 2.4: Princip systému iDAS

Akustická šířka pásma a rozsah vzorkování [9]

Akustická šířka pásma systému iDAS nebývá obvykle limitována funkcí samotného snímacího mechanismu, nýbrž fyzickými parametry samotného přenosu akustického signálu ze zdroje do snímacího vlákna. Naopak při vhodném nastavení lze měřit frekvence i v řádech tisíců Hz , což jsou nejnižší frekvence, které systém iDAS dokáže generovat. Stejně tak lze měřit frekvence v řádech kHz . Co se týče akustické rychlosti vzorkování, ta závisí od doby zpětného vypnutí optického impulsu ve vlákne, jelikož je žádoucí mít v jednom vláknu pouze jeden impuls, aby se zabránilo přeslechům. Za předpokladu, že se světlo ve skle pohybuje rychlostí $2 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tedy vychází pro vlákno o délce 10km maximální akustická vzorkovací frekvence 10kHz [3]. Tuto frekvenci je ovšem možné zvýšit, a to prokládáním světla více lasery s různými vlnovými délkami.

Prostorové rozlišení

Při určování prostorového rozlišení snímacího systému je velmi důležitým faktorem délka optického impulsu pro dotazování vlákna. Ku příkladu pro vlákno o délce 1m je potřeba pulz o délce alespoň 10ns. Faktorem souvisejícím s prostorovým rozlišením je vzdálenost po sobě jdoucích vzorkovacích bodů neboli rozlišení vzorkování.

Systém iDAS umožňuje prostorové rozlišení od 1 do 10m, a to s rozlišením odběru až 25cm. Nicméně k dosažení co nejjemnějšího prostorového rozlišení je vyžadováno užití vysokorychlostní elektroniky i vysokorychlostního zpracování dat, což vede ke značnému zvyšování komplikovanosti návrhu celého systému [3], [5].

Měřicí rozsah

Maximální dosažitelný rozsah snímání závisí na dvou faktorech, a to na počtu vzorkovacích bodů, které lze v systému iDAS zpracovat, a optických ztrátách podél vlákna. Pro ztráty využívá model iDAS ideální optickou vlnovou délku, ta se pohybuje okolo 1500nm, díky čemuž může jeden systém dosáhnout vzdálenosti až 40km s více než uspokojivým poměrem signál/šum (SNR). Pakliže je zapotřebí dosáhnout ještě větších vzdáleností, je nezbytné přidání optických zesilovačů, což jsou v optických komunikačních systémech běžné součásti. S tímto zapojením lze dosáhnout vzdálenosti až 80km se zanedbatelnou signální degradací šumu. Hardware současného systému iDAS je schopen současně zpracovat více než 40000 snímacích bodů. Z toho vyplývá, že jeden iDAS dokáže vzorkovat vzdálenost větší než 40km s odběrem pouhý 1m. Po přidání výše zmíněných zesilovačů pak 80km se vzorkováním 2m [9].

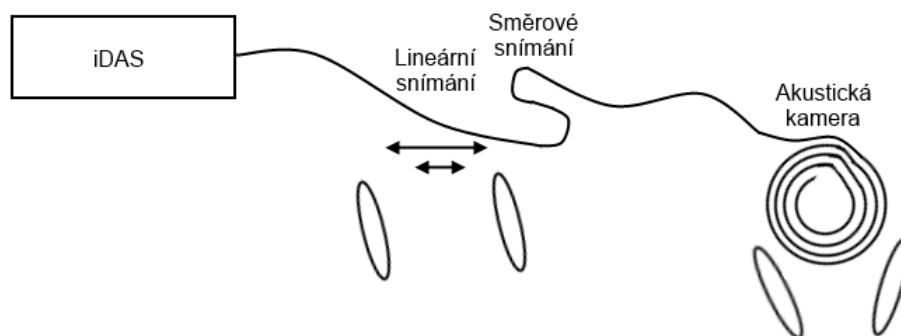
Tvorba paprsků

Distribuované vibrační senzory dokáží lokalizovat zdroje seismických vln blízko kabelu, nicméně nemohou detekovat fázi akustického pole, tudíž nelze určit vzdálenost zdroje od kabelu. Ovšem technologii iDAS je možné použít pro formování paprsků (fázově posunuté přidávání akustických polí měřeno v různých snímacích bodech). To umožňuje nalezení zdroje vzhledem ke kabelu a zároveň selektivně naslouchat různým místům v akustickém poli. V současné době se tato technika používá především k monitorování mikroseismů a zlomů, kde je možné přesně odhadnout polohu zdroje i rychlost zvuku v zemi měřením emitovaných signálů na různých místech podél celého optického vlákna [5], [9].

Akustická kamera

Technologie iDAS nabízí možnost vytvoření masivní akustické kamery či dalekohledu, což je pro seismické aplikace velmi žádoucí. Ve standardním případě je kabel zaveden jako jednoduché lineární pole. Avšak je vhodné vytvořit co nejlepší podmínky pro snímání seismických signálů. K tomuto účelu slouží akustická kamera, která se vytváří pomocí formování optického vlákna do dvourozměrného pole (mřížka, spirála), nebo ještě přesnějšího třírozměrného pole. Oba druhy polí lze vytvořit jediným, flexibilním optickým kabelem. Nutno však poznamenat, že iDAS pracuje na principu přesného měření axiálního namáhání na jádře snímacího vlákna. Především díky vhodnému návrhu snímacího kabelu existuje značný prostor pro

zlepšení citlivosti systému. Tvorba pole s vysokou hustotou generování paprsku vyžaduje dlouhou délku optického vlákna. Pro představu pro pole 1km^2 tvořeno jedním kabelem rozmístěným v paralelních liniích vzdálených 20m od sebe, je potřeba přibližně 54km vláknového kabelu. Důraz je přitom kladen na dostatečně vysoký poměr signálu k šumu a zachování jemného prostorového rozlišení, které je žádoucí pro mnoho aplikací [9].



Obr. 2.5: Příklady polí tvořených kabelem s jedním vláknem [5], [9]

2.3 Snímač FBG

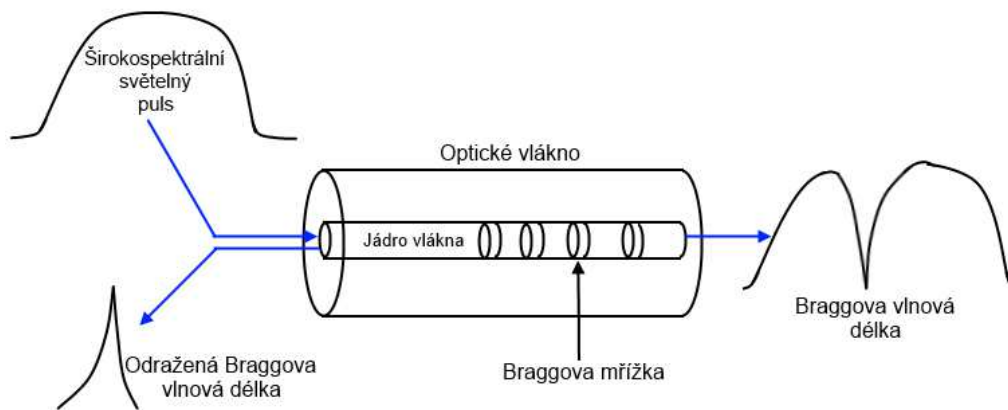
Především v průmyslovém odvětví je velmi oblíbený snímač FBG neboli vláknová mřížka Bragg, která odráží vlnovou délku světla. Tato vlnová délka se mění v závislosti na deformačních či teplotních změnách [19].

Princip FBG

Snímače FBG jsou konstruovány pomocí holografického rušení nebo tzv. fázové masky, která dokáže vystavit krátkou délku fotosenzitivních vláken periodickému rozložení intenzity světla. Právě podle intenzity světla se trvale mění index lomu vlákna. Tato periodická změna indexu lomu nese název Braggova mřížka. V případě, že je do této mřížky zaslán širokospektrální světelný puls, odrazy od každého segmentu střídavého indexu lomu se projeví jen na specifickou vlnovou délku světla [18], [19]. Tato vlnová délka nese název Braggova vlnová délka a je definována vztahem [19]:

$$\lambda_b = 2n\Lambda, \quad (2.3.1)$$

kde λ_b je Braggova vlnová délka, n značí tzv. účinný index lomu jádra vlákna a Λ představuje vzdálenost mezi mřížkami. Tato vzdálenost bývá obvykle nazývána dobou mřížky.



Obr. 2.6: Princip snímače FBG [19]

Vzhledem k tomu, že Braggova vlnová délka je funkcí vzdálenosti mezi jednotlivými mřížkami, mohou být snímače FBG vyráběny s různými Braggovými vlnovými délkami. Ke změně odražené vlnové délky přispívají nemalou měrou i změny namáhání či teploty, jelikož změnami těchto veličin se mění jak doba mřížky FBG, tak i účinný index lomu. Tato změna vlnové délky, v důsledku různých deformací a změny teploty, je popsána jako [18]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - p_e) \cdot \varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \cdot \Delta T, \quad (2.3.2)$$

kde λ_0 představuje počáteční vlnovou délku a $\Delta\lambda$ značí posun vlnové délky. První výraz pravé strany této rovnice pak popisuje vliv napětí na posun vlnové délky, kde P_e je koeficient kmitočtu a ε představuje namáhání, k němuž dochází uvnitř mřížky. Druhý výraz definuje vliv teploty na posun vlnové délky, kde α_Λ je součinitel teplotní roztažnosti. Tento součinitel popisuje šířku mřížky v závislosti na teplotě. α_n představuje termo-optický koeficient, který definuje změnu indexu lomu v závislosti na teplotě [17].

Jelikož FBG reaguje na teplotu i namáhání, je žádoucí tyto dvě veličiny zohlednit. Pro zajištění stálé teploty jsou používány tzv. balené teplotní senzory FBG. Tento obal zajišťuje uvnitř prostředí, které není ovlivněno žádnými ohybovými či kompresními silami. Přitom koeficient roztažnosti skla α_Λ je zanedbatelný, tudíž změny v odražené vlnové délce způsobené změnami teploty mohou být popsány změnou indexu lomu vlákna. Tenzometry FBG jsou poněkud složitější, poněvadž teplota i namáhání ovlivňují odraženou vlnovou délku senzoru. Pro správné měření namáhání je nezbytné kompenzovat teplotní účinky. Toho lze dosáhnout pomocí teplotního snímače v těsné blízkosti tenzometru FBG. Odečtením posunu vlnové délky teplotního snímače od posunu vlnových délek snímače FBG se dosáhne hodnoty teplotní kompenzační deformace [17], [19].

Optické snímače FBG jsou vhodné pro měření na dlouhé vzdálenosti s velmi malou ztrátou integrity, a to kvůli laděnému laseru s velmi vysokým výkonem. Tyto snímače našly velkou oblibu především u průmyslových aplikací.

2.4 Snímač SOFO

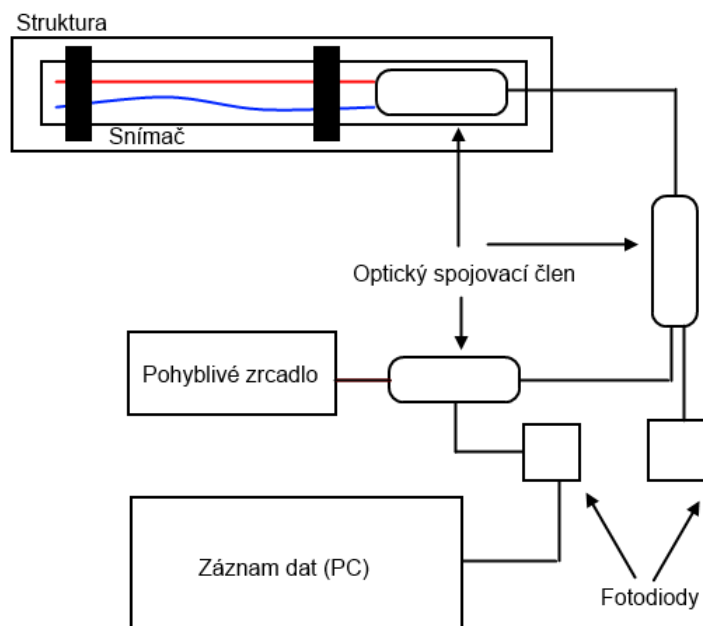
Systém SOFO (Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques) neboli systém pro kontrolu struktur pomocí optických vláken lze definovat jako snímač pohybu optických vláken s vysokým rozlišením a velmi dobrou dlouhodobou stabilitou.

Princip SOFO

Statický měřicí systém SOFO je založen na principu interferometrie s nízkou koherencí. Infračervený paprsek LED diody je spuštěn do standardního jednovidového vlákna. Tento paprsek je přes optický směrovací člen rozdělen do dvou optických vláken uložených ve struktuře, která má být monitorována. Měřicí vlákno je v mechanickém kontaktu se samotnou strukturou, což způsobí jeho deformaci. Druhé vlákno, někdy též označováno jako referenční, je uloženo volně ve stejné struktuře. Na konci obou vláken jsou umístěná zrcadla, která odráží světlo zpět na optický směrovací člen. Ten následně oba paprsky rekombinuje a nasměruje k analyzátoru, který je definován také dvěma vlákny, a tedy lze pomocí něj zavést známý rozdíl trasy mezi nimi pomocí pohyblivého zrcadla. Při pohybu tohoto zrcadla se na fotodiodě objeví modulovaný signál, ale jen za předpokladu, že rozdíl mezi vlákny v analyzátoru kompenzuje rozdíl mezi vlákny v měřené struktuře. Každé měření poskytuje novou kompenzační pozici, kterou konstrukce tohoto systému vystavila předchozím bodům [4].

Z výše uvedeného vyplývá, že čtecí jednotka může být zcela odpojena či používána k monitorování jiných senzorů vlákna a jiných konstrukcí. Systém SOFO je schopen ukládat měření pomocí počítače pro sběr dat prostřednictvím modemu či kabelu.

Při potřebě měřit pomocí systému SOFO při vysokých frekvencích se zavádí dynamická čtecí jednotka, která je založena na principu fázové modulace signálu demodulačním interferometrem. Jedna tato jednotka může být využita k demodulaci až 8 kanálů. Pro větší počet kanálů je nutností jednotky kombinovat. Bezesporu největší výhodou dynamické jednotky je její univerzálnost, díky které ji lze použít u senzorů určených pro statická měření [20], [4].



Obr. 2.7: Princip systému SOFO [4]

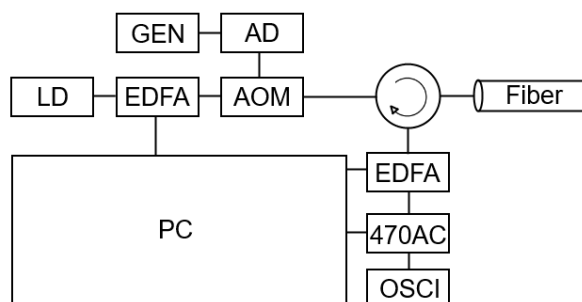
Systém SOFO je velmi výrazně využíván v průmyslových aplikacích kvůli nízkým nákladům na životnost a celkové spolehlivosti. Široké uplatnění tento systém poskytuje v každodenním provozu různých architektur náchylných na celkové namáhání jako jsou mosty, kdy je systém SOFO schopen měřit namáhání těchto struktur v reálném čase.

3 VÝSLEDKY STUDENTSKÉ PRÁCE

Tato kapitola se zabývá analýzou již hotových náměrů získaných z reálného testovacího zapojení, které je níže detailně popsáno. Dále jsou zde znázorněny samotné náměry a řešena problematika metod pro odstranění šumu, či zvýraznění relevantní informace ze signálu. Pro lepší pochopení dané problematiky jsou jednotlivé metody popsány a následně implementovány na získané náměry v interaktivním programovém prostředí MATLAB.

3.1 Popis zapojení pro měření seismických vln

Pro získání náměrů bylo vybráno testovací zapojení zobrazené na Obr. 3.1. Principem funkce se toto zapojení podobá distribuovanému akustickému senzoru (DAS).



Obr. 3.1: Zapojení senzorického systému DAS

Zdrojem úzkopásmového záření je laserová dioda. Avšak toto záření je velmi slabé, je třeba jej proto zesílit, a to pomocí zesilovače EDFA. Generátor vytváří signál, kterým je v akustickém optickém modulátoru optické záření upraveno na požadovanou podobu. Poté jsou pulzy posílány do optického vlákna skrze optický cirkulátor. Zpětně odražený signál není silný, je tedy nezbytné jej zesílit. K tomuto účelu se používá druhý zesilovač EDFA. Zesílený signál je následně odeslán na fotodetektor, který slouží k přeměně optického signálu na signál elektrický. Nyní je již možné signál zobrazit v osciloskopu či počítači. Samotný počítač je určen pro nastavení parametrů zesilovačů a pro dodatečné zobrazení výsledků v případě absence osciloskopu. Celý koncept je konstruován tak, aby bylo možné celý systém ovládat z jednoho centrálního prvku, kterým je počítač. Senzorický systém pak disponuje panelem pro připojení externích komponent, jak je znázorněno na Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Panel pro připojení externích komponent

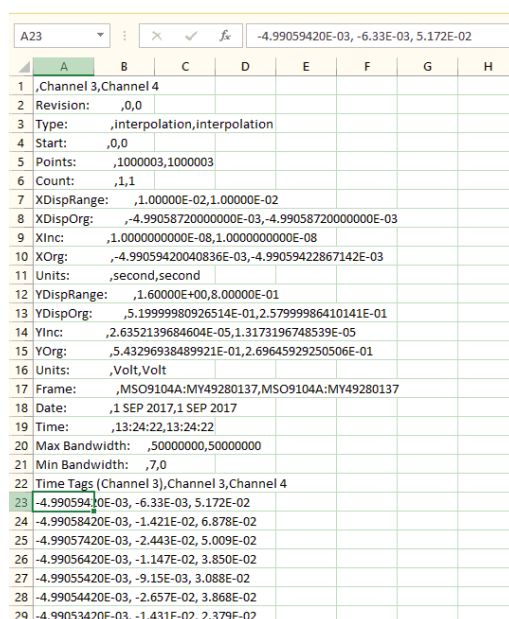
3.2 Náměry

Samotné náměry, určené k dalšímu zpracování, byly získány pomocí výše popsaného zapojení, a to jak na školních laboratorních trasách, tak na trasách reálných. Přestože měření ve školních laboratorních podmínkách by z logiky věci mělo vykazovat přesnější údaje, není tomu tak vždy. Na reálné trase se nachází měřené optické vlákno necelý metr pod zemí, tudíž úroveň náměrů závisí především na kvalitě celého měřicího aparátu s důrazem kladeným na kvalitu již zmíněných optických vláken a generátoru jednotlivých pulzů. Avšak tento typ měření je odolný vůči vlivům prostředí jako jsou změny teploty či vlhkosti. Na druhou stranu při provádění měření v laboratorním prostředí školy je zajištěna nejvyšší jakost celého měřicího aparátu, nicméně lze zde jen těžko zabránit teplotním změnám či výkyvům, kdy jsou zejména samotná optická vlákna na tyto změny velmi citlivá.

Jak již bylo popsáno v předchozí kapitole, náměry jsou ukládány na pevný disk, kde je možné měnit styl uložení i typ finálního souboru. Ve výchozím nastavení jsou hodnoty jednotlivých odezev světelného pulzu zapisovány za sebou do vektoru, který je po dosažení dané délky, např. 10s záznamu naplněn a následně uložen na pevný disk. Stylem uložení je pak myšleno, zda budou vektory dva, a to jeden pro světelné pulzy a druhý pro odezvy, či bude vektor jeden tak jak byl výše popsán, tedy všechny hodnoty uloženy za sebou bez ohledu na to, jestli se jedná o světelné pulzy použité do optického vlákna, nebo jejich odezvy. Typ finálního souboru může být volen na základě požadavků uživatele, v této diplomové práci byly získané náměry uloženy v binárním souboru a v souborovém formátu CSV.

3.2.1 Souborový formát CSV

Náměry využívající formát CSV jsou obvykle ukládány přímo z kanálů osciloskopu. Tyto náměry mají pak podobu tabulky, kde jsou první řádky rezervovány pro hlavičku, která obsahuje údaje o měření jako jsou čísla kanálů, datum, čas a rozsahy, či jednotky, ve kterých bylo měření prováděno. Formát náměrů lze vidět na Obr. 3.3. Prvních 22 řádků tabulky pak zabírá hlavička následovaná samotnými hodnotami náměrů. Ty jsou rozděleny do 3 sloupců, kdy hodnoty nejvíc nalevo určují čas, uprostřed se nachází hodnoty pro světelné pulzy pouštěné do vlákna a v posledním sloupci jsou samotné odezvy. Jedná se tedy o data uložena ze dvou kanálů, jednoho pro vysílané pulzy do vlákna a druhého pro následné odezvy.

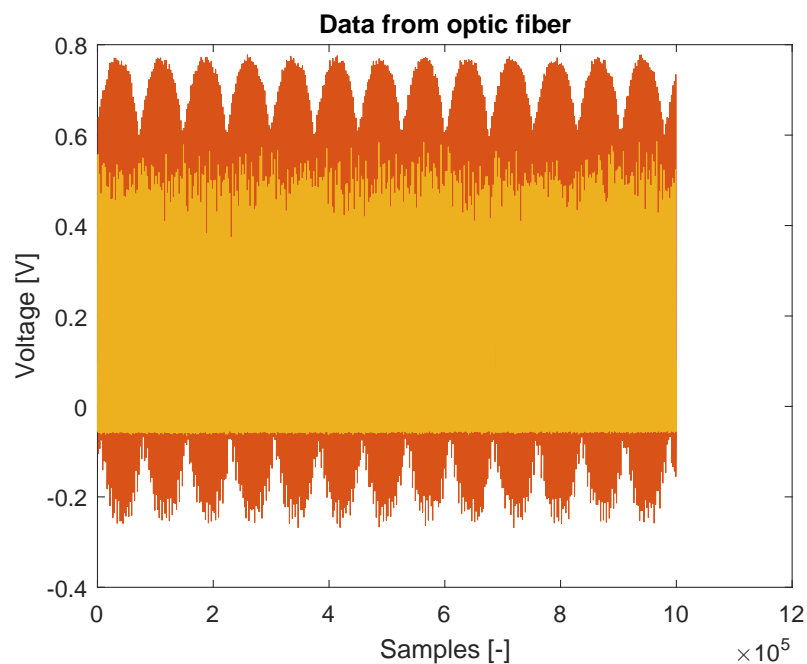


A23									-4.99059420E-03, -6.33E-03, 5.172E-02
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	,Channel 3,Channel 4								
2	Revision:	,0,0							
3	Type:	,interpolation,interpolation							
4	Start:	,0,0							
5	Points:	,1000003,1000003							
6	Count:	,1,1							
7	XDispRange:	,1.00000E-02,1.00000E-02							
8	XDispOrg:	, -4.99058720000000E-03, -4.99058720000000E-03							
9	XInc:	,1.0000000000E-08,1.0000000000E-08							
10	XOrg:	, -4.99059420040836E-03, -4.99059422867142E-03							
11	Units:	,second,second							
12	YDispRange:	,1.60000E+00,8.00000E-01							
13	YDispOrg:	,5.1999980926514E-01,2.5799986410141E-01							
14	YInc:	,2.6352139684604E-05,1.3173196748539E-05							
15	YOrg:	,5.43296938489921E-01,2.69645929250506E-01							
16	Units:	,Volt,Volt							
17	Frame:	,MSO9104A:MY49280137,MSO9104A:MY49280137							
18	Date:	,1 SEP 2017,1 SEP 2017							
19	Time:	,13:24:22,13:24:22							
20	Max Bandwidth:	,50000000,50000000							
21	Min Bandwidth:	,7,0							
22	Time Tags (Channel 3),Channel 3,Channel 4								
23		-4.99059420E-03, -6.33E-03, 5.172E-02							
24		-4.99058420E-03, -1.421E-02, 6.878E-02							
25		-4.99057420E-03, -2.443E-02, 5.009E-02							
26		-4.99056420E-03, -1.147E-02, 3.850E-02							
27		-4.99055420E-03, -9.15E-03, 3.088E-02							
28		-4.99054420E-03, -2.657E-02, 3.868E-02							
29		-4.99053420E-03, -1.431E-02, 2.379E-02							

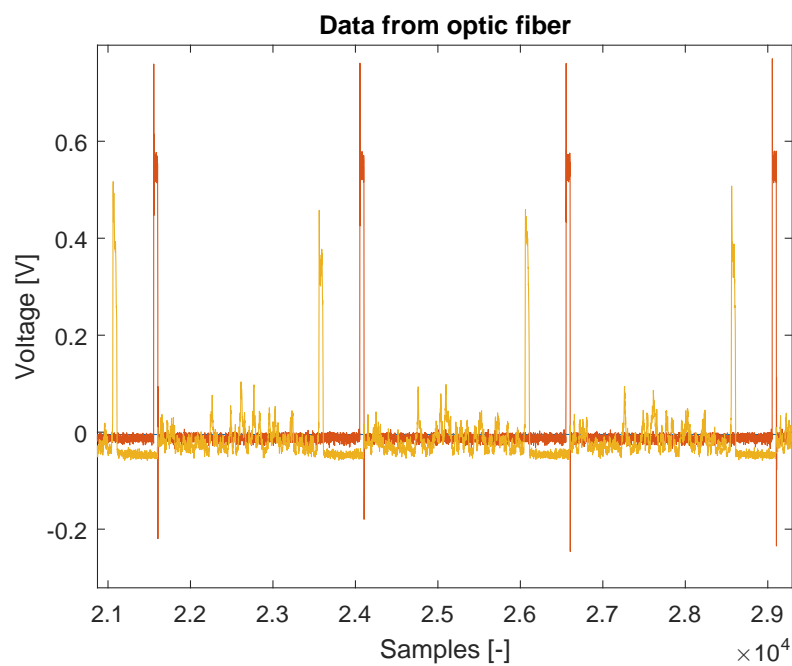
Obr. 3.3: Náměry ve formátu CSV

Náměry zapsány tímto způsobem lze pak již načíst v interaktivním programovém prostředí MATLAB, avšak je důležité si uvědomit, že analyzovány mají být pouze měřené hodnoty, nikoliv samotná hlavička, tu je tedy nezbytné při načítání přeskočit. Načtená data je možné vidět na Obr. 3.4, kdy červenou barvou jsou znázorněny světelné pulzy a oranžová barva reprezentuje zachycené odezvy.

Pro lepší představu je žádoucí data přiblížit jak ukazuje Obr. 3.5. Červené špičky značí náběžné hrany jednotlivých pulzů a barva oranžová zachycenou odezvu těchto pulzů. Za zmínku stojí oranžové špičky znázorňující odraz od konce optického vlákna.



Obr. 3.4: Načtená data



Obr. 3.5: Přiblížené náměry

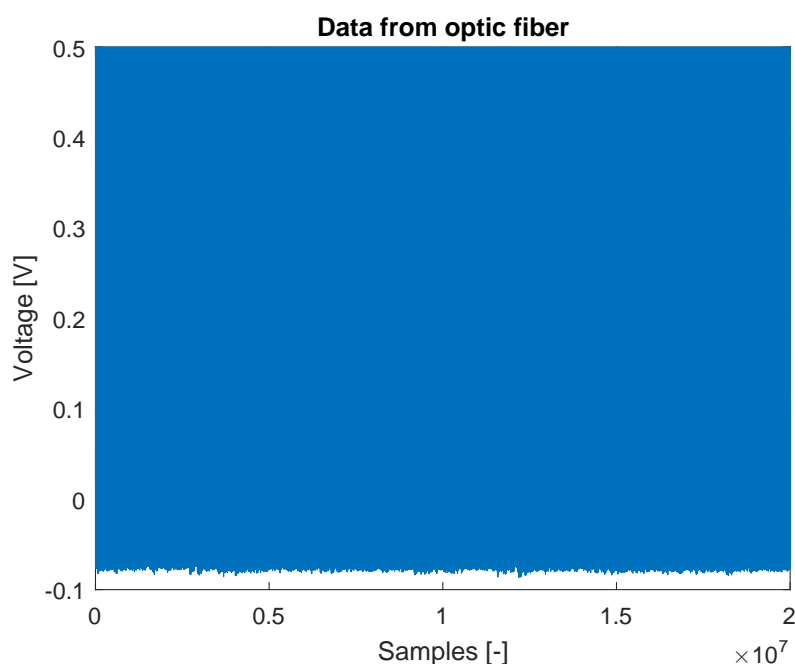
Mezera mezi odrazy od konce vlákna a náběžnými hranami jednotlivých pulzů je způsobena generátorem těchto pulzů. Ten má nastavenou určitou periodu vysílání

pulzů do vlákna, nicméně ta není úměrná velikosti vlákna, tudíž po zachycení odrazu od konce vlákna vzniká malá mezera před vysláním následujícího pulzu.

Nejdůležitějším předpokladem pro úspěšnou analýzu takových dat je jejich přesné zarovnání, tedy aby odezvy korespondovaly s jednotlivými pulzy. V tomto konkrétním případě jsou data již zarovnaná, tudíž připravená k dalšímu zpracování.

3.2.2 Binární soubor

Druhou variantou ukládání náměrů na pevný disk je uložit tato data jako binární soubor. V souboru binárního typu jsou data reprezentována číslicemi binární soustavy, tedy jako řetězec jedniček a nul. Samotná data nejsou čitelná v textových či tabulkových editorech jako tomu bylo u předchozího formátu, nicméně lze je rovnou načítat v programu MATLAB. Hlavičku s parametry měření není nutné přeskakovat, neboť je uložena v samostatném souboru.

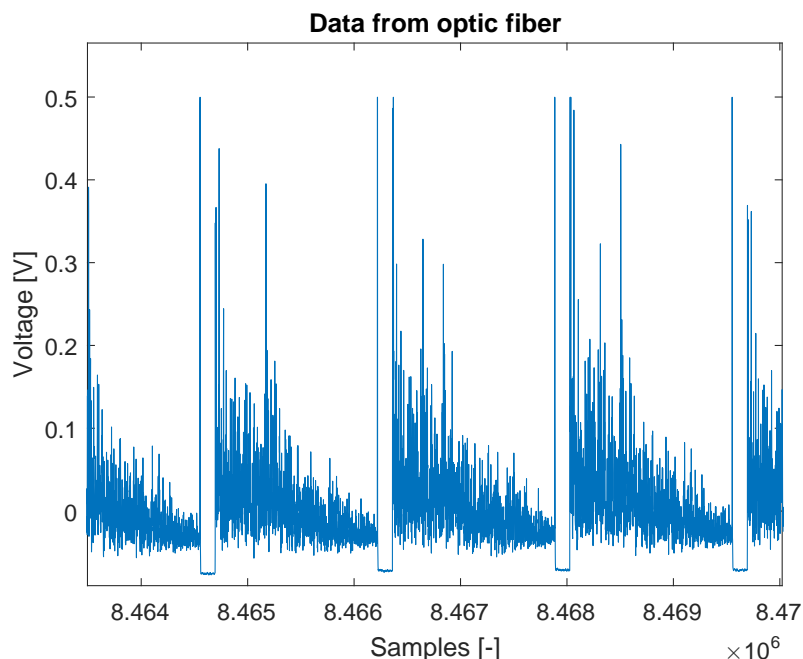


Obr. 3.6: Načtená data z binárního souboru

Načtená data zobrazuje Obr. 3.6. Tato data byla získána měřením v laboratoři a uložena pouze z jediného společného kanálu, tedy vektoru, ve kterém jsou mezi sebou uloženy jak hodnoty odezev, tak i hodnoty pro vysílání pulzů do optického vlákna. Za zmínku ještě stojí fakt, že konkrétně tyto náměry reprezentují 10 sekund záznamu z reálné trasy.

Při bližším pohledu, uvedeném na Obr. 3.7, je možno rozeznat začátek a konec vlákna u jednotlivých pulzů, kdy první špička opět představuje náběžnou hranu

pulzu světla pouštěnou do optického vlákna a poslední špička reprezentuje odraz od konce vlákna.



Obr. 3.7: Načtená data z binárního souboru

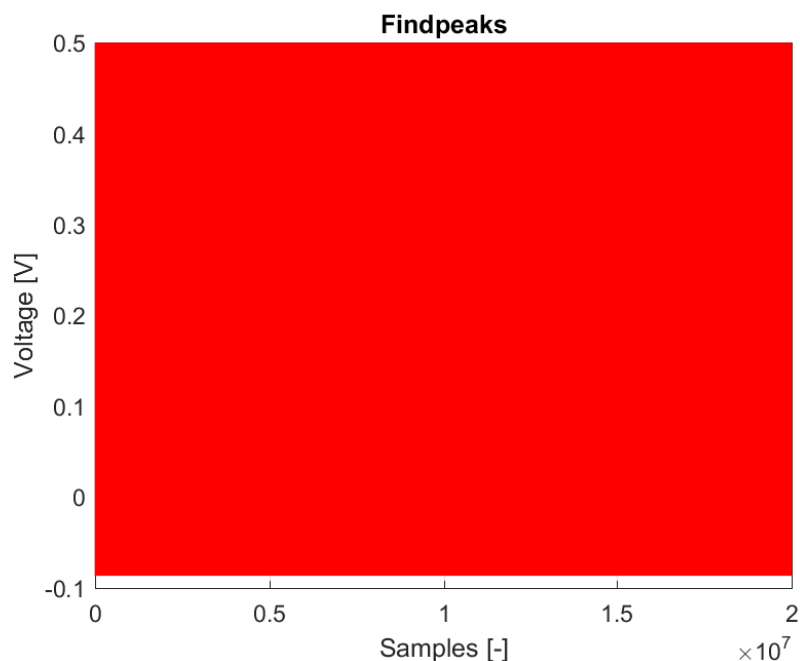
Takto načtená data již lze dále zpracovávat. Binární soubor se jako typ ukládání náměrů osvědčil nejvíce, a to především kvůli rychlosti ukládání a načítání dat, která je několikanásobně vyšší, než tomu bylo u souborového formátu CSV.

3.3 Segmentace náměrů

Počet vzorků neboli doba mezi dvěma náběžnými hranami světelných pulzů se nazývá repetice. Před samotným filtrováním dat je nezbytné tato data segmentovat, tedy rozdělit na jednotlivé repetice. Jinými slovy to znamená rozdělit vektor dat do matice, kde budou všechny repetice zarovnané přesně pod sebou. Ke splnění této podmínky je žádoucí implementovat algoritmus, který bude v daném vektoru dat hledat požadované špičky a na základě nich řadit daná data pod sebe. Nutno ovšem podotknout, že tento algoritmus nemá stejnou podobu pro data načtená jako jeden kanál či kanály dva.

Na Obr. 3.8 je zobrazen výsledek algoritmu detekce špiček pro data načtená jako jeden vektor. Na první pohled by se mohlo zdát, že jsou detekovány všechny špičky v celém vektoru, avšak při přiblížení jednotlivých vzorků Obr. 3.9 je možno pozorovat,

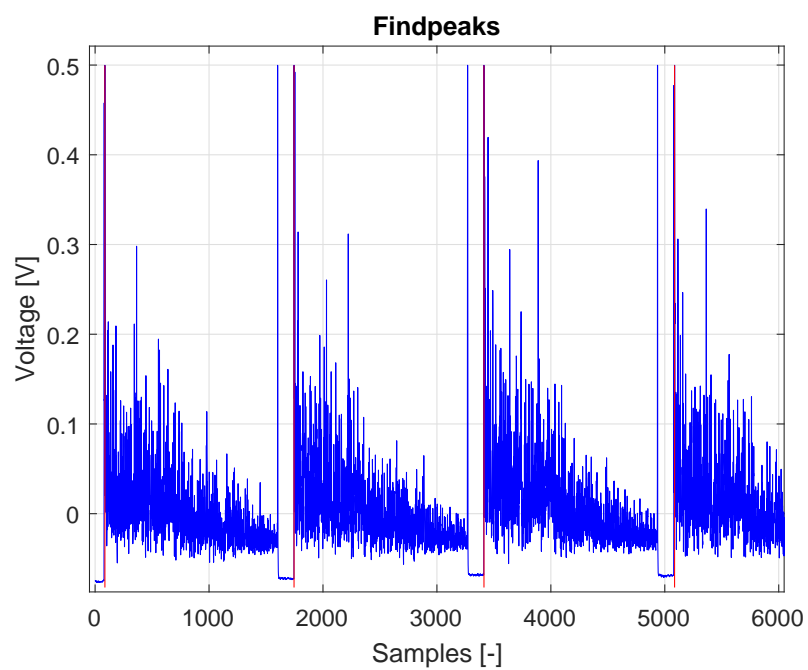
že označené špičky jsou právě ty, které reprezentují náběžnou hranu světelného pulzu (červeně označené špičky).



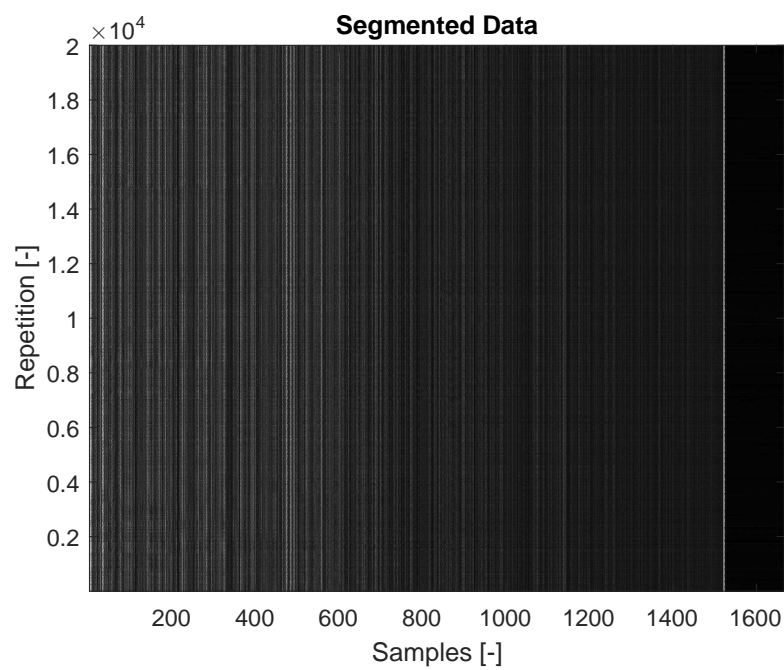
Obr. 3.8: Segmentovaná data

Za předpokladu, že jsou špičky detekovány správně, je v dalším kroku nutno provést seřazení jednotlivých repetit pod sebe do matice. Takto seřazené repetice prakticky utvářejí měřenou trasu. Taková trasa je vyobrazena na Obr. 3.10. Pro co nejlepší znázornění byla volena paleta barev s kontrastem černé a bílé.

V matici repetit je nejvíce viditelný odraz od konce vlákna, a to přibližně okolo vzorku 1550. Data zapsaná v této podobě však jsou již připravena k samotné filtraci šumu a zvýraznění relevantní informace.



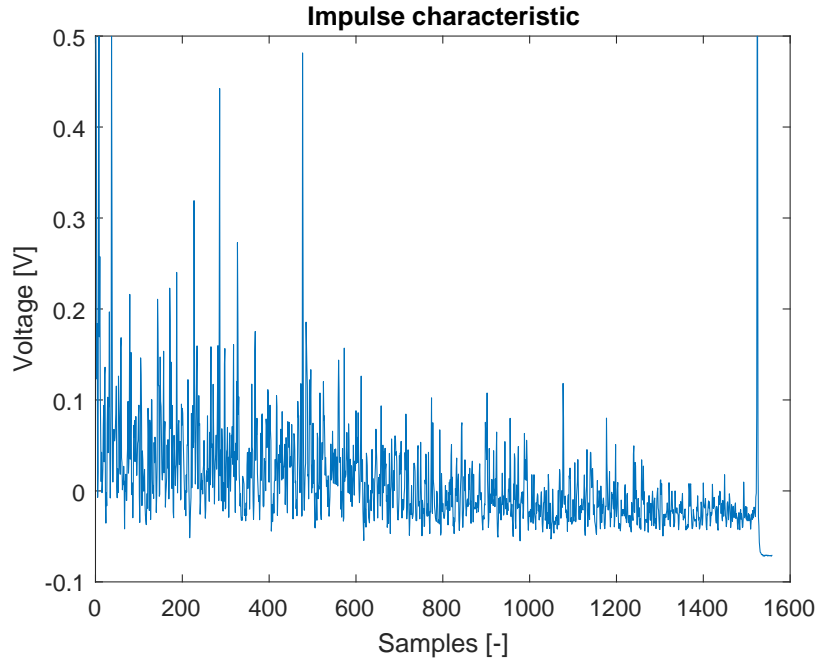
Obr. 3.9: Detekování náběžných hran světelného pulzu



Obr. 3.10: Repetice seřazené pod sebe do matice

3.3.1 Impulzní charakteristika

Pro kontrolu správné segmentace dat je vhodné použít impulzní charakteristiku, která vyjadřuje odezvu časově invariantního systému na jednotkový impuls. Impulzní charakteristiku je možno spočítat pro celá data, avšak po segmentaci náměrů jsou repetice seřazeny do matice přesně pod sebou. Z toho vyplývá, že pro ověření celých dat postačí zobrazení impulzní charakteristiky pro jednu libovolnou repetici, která je zobrazena na Obr. 3.11.



Obr. 3.11: Impulzní charakteristika jedné repetice

Velká špička na počátku znázorňuje začátek vlákna, naopak okolo vzorku 1500 je zřetelný odraz od konce vlákna, hodnoty za tímto odrazem jsou nejmenší v celých datech. Z toho vyplývá, že se jedná o mezeru mezi koncem vlákna a následujícím světelným pulzem vyslaným do vlákna generátorem. Za povšimnutí pak stojí zejména ještě špičky u vzorků 300 resp. 450, kde je jejich hodnota mnohem vyšší, než u zbytku náměrů. Avšak reprezentovat data po vzorcích je značně nepraktické, proto je žádoucí reprezentovat náměry jako vzdálenost. Pro výpočet vzdálenosti je použit vztah:

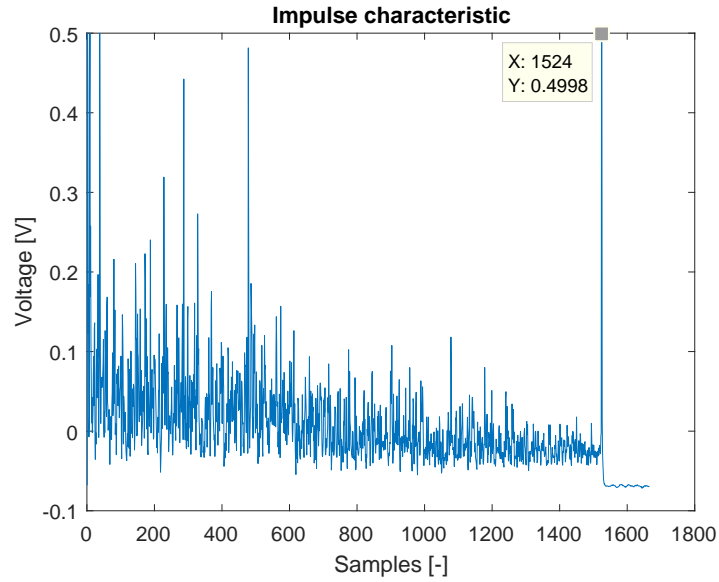
$$L = \left(\frac{N}{2 \cdot F_s} \right) \cdot c, \quad (3.3.1)$$

kde L znázorňuje délku vlákna v metrech, N značí vzorek odpovídající konci vlákna, tento vzorek je určen z impulzní charakteristiky viz. Obr. 3.12, F_s představuje vzorkovací kmitočet a c reprezentuje rychlost světla ve vlákne.

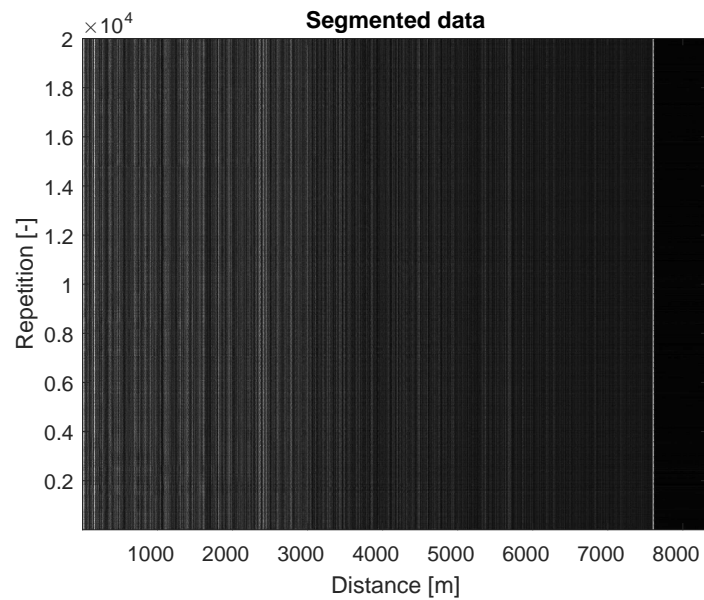
Ze znalosti L lze pak odvodit vzdálenost odpovídající každému vzorku podle vztahu:

$$l = L + \left(\frac{n-N}{2 \cdot F_s}\right) \cdot c, \quad (3.3.1)$$

kde n reprezentuje daný vzorek na trase.



Obr. 3.12: Vzorek odpovídající konci vlákna



Obr. 3.13: Náměry převedeny na vzdálenost

Náměry vyjádřeny vzdáleností, jsou znázorněny na Obr. 3.13. Z něj vyplývá, že data byla měřena na trase dlouhé 7620m. Potenciální události vyskytující se okolo vzorků 300 resp. 450 odpovídají tedy 1650m resp. 2400m. Tyto špičky mohou znamenat neobvyklou událost. Ve skutečnosti vyjadřují tyto špičky přejíždění prstů po optickém vlákně. K detekování takových událostí je využito několika metod pro redukci šumu.

3.4 Metody pro redukci šumu

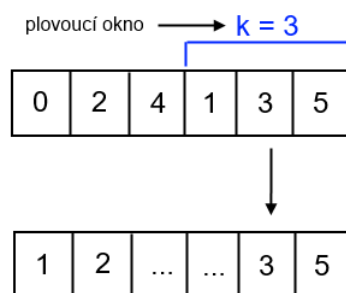
V naměřených datech se mohou vyskytovat neobvyklé události znamenající chvění země. Může se jednat o nepodstatné řezání pilou na trase, nebo bouchání kladivem do kovové trubky uložené v zemi. Na druhou stranu mohou takové události indikovat vibrace způsobené dálnicí umístěné nedaleko měřené lokality, což není žádoucí pro výstavbu rodinných domů. Tyto vibrace jsou často zdrojem praskání zdí či chvění okenních tabulí. A právě pro detekci takových událostí se používají matematické metody pro redukci šumu a zanedbání redundantní informace v signálu.

3.4.1 Metoda založená na plovoucím průměru

Metoda plovoucího průměru, někdy též nazýván jako klouzavý průměr, je v technické analýze široce používaným ukazatelem k vyhlazení dat. Vytváří nová data, ve kterých jsou nepravidelné hodnoty potlačeny. Plovoucí průměr je vypočítán tak, že každá hodnota v číselné řadě je nahrazena střední hodnotou sousedních hodnot. V praxi jsou hojně využívány dva typy plovoucích průměru, a to jednoduchý plovoucí průměr (SMA) a exponenciální plovoucí průměr (EMA) [23], [24].

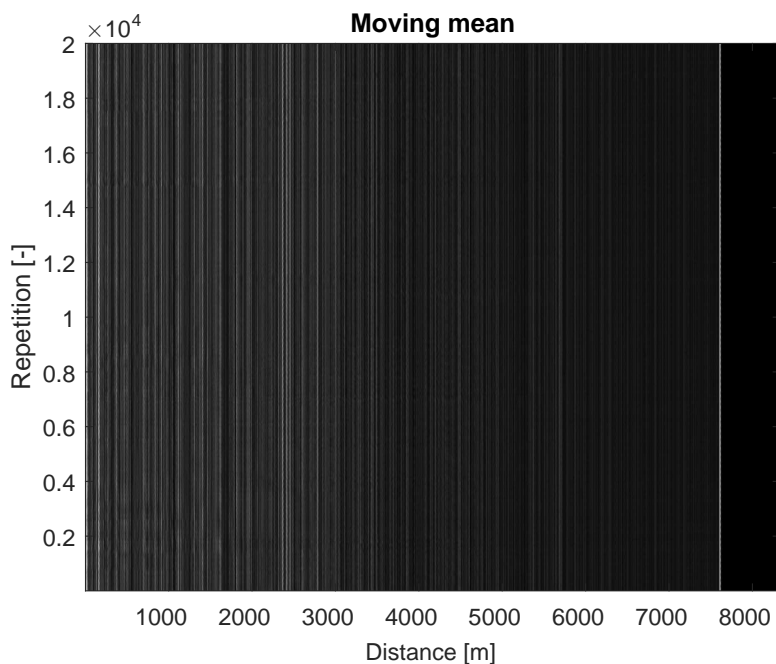
- SMA – vyjadřuje nevážený průměr předchozích nebo následujících dat, kde je střední hodnota obvykle převzata ze stejného počtu dat na obou stranách centrální hodnoty. Počet dat na stranách centrálního prvku je nazýván plovoucí okno Obr. 3.14. Tím je zajištěno, že změny jsou změny v průměru vyrovnány odchylkám v datech, tudíž nedochází k posunu dat v čase [23].
- EMA – též známý jako exponenciálně vážený plovoucí průměr (EWMA) je typ nekonečného filtru impulzní odezvy, který využívá exponenciálně klesající faktory. Vážení pro starší hodnoty se exponenciálně snižuje, avšak nikdy nedosáhne nulové hodnoty [23], [24].

Pro analýzu získaných náměrů je použit jednoduchý plovoucí průměr počítaný jako průměr impulzních charakteristik, kde je volena délka plovoucího okna. U této volby je třeba zvýšené opatrnosti, jelikož nepřiměřeně velké plovoucí okno má za následek odstranění nejen šumu, ale i veškeré relevantní informace, která je v náměrech obsažena.



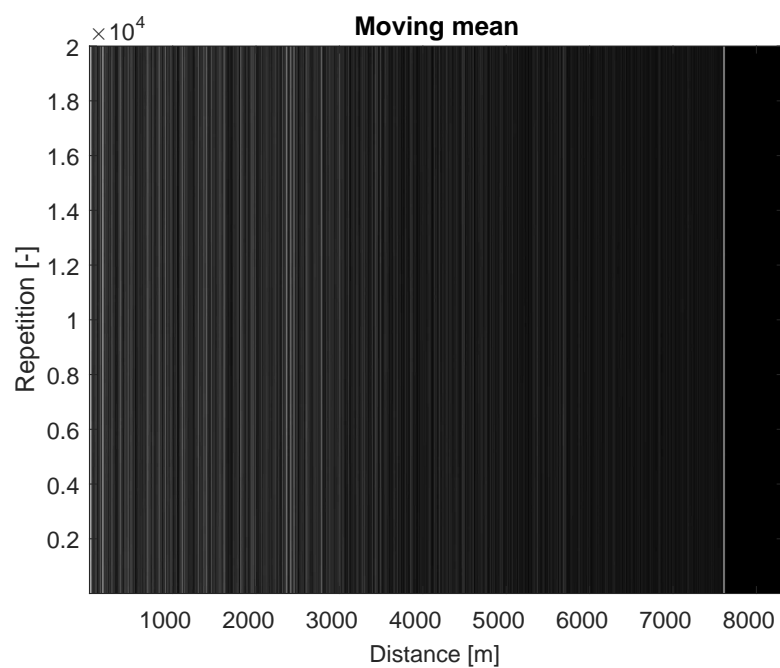
Obr. 3.14: Princip plovoucího průměru

Pro názornost jsou uváděny dva případy. V prvním má plovoucí okno velikost 100 prvků. Na Obr. 3.15 lze pozorovat vyhlazení náměrů při zachování nezanedbatelného množství relevantní informace. U druhého případu bylo plovoucí okno nastaveno na 5000 prvků. Výsledek plovoucího průměru je pak na Obr. 3.16. Rozdíl oproti prvnímu případu je znatelný, při volbě několikanásobně většího plovoucího okna je šum zcela potlačen, nicméně jsou potlačeny i relevantní informace.

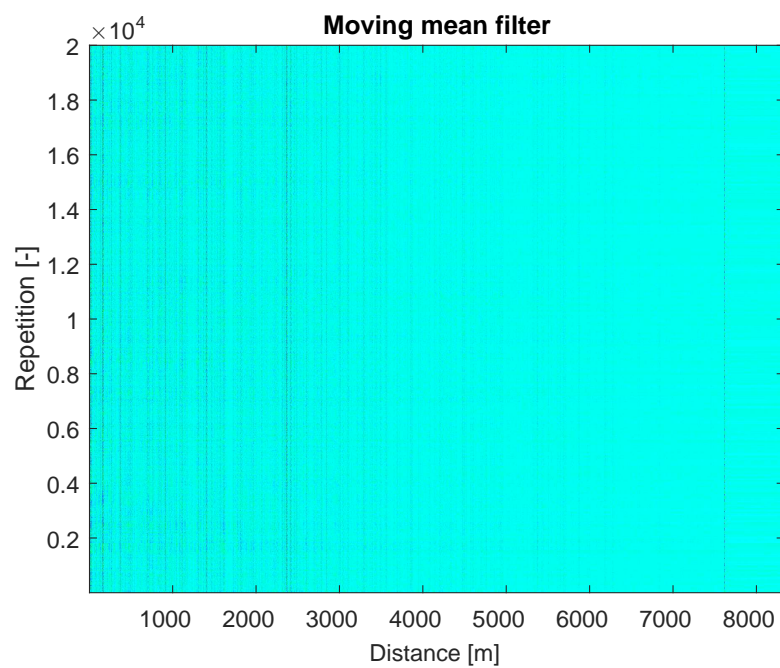


Obr. 3.15: Plovoucí průměr pro délku okna 100 prvků

Šum byl částečně zredukován, ovšem zajímavé události znatelně zvýrazněny nebyly. To je možné kompenzovat odstraněním redundantní informace z náměrů. Kompenzaci lze provádět několika způsoby, jako jeden z nejvhodnějších se jeví odečtení náměrů od plovoucího průměru. Takový rozdíl demonstruje Obr. 3.17.

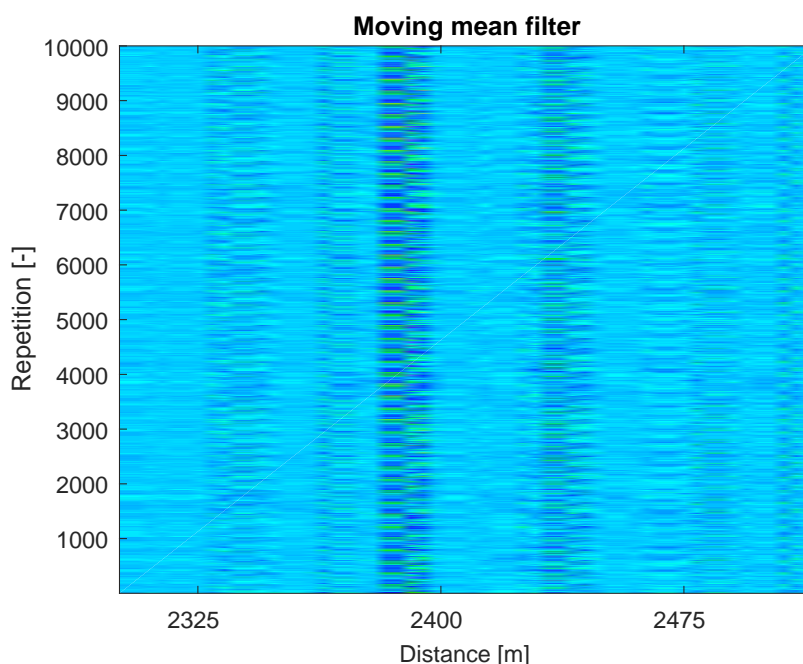


Obr. 3.16: Plovoucí průměr pro délku okna 5000 prvků



Obr. 3.17: Odečtení náměrů od plovoucího průměru

Pomocí takového filtru nejsou významné události příliš dobře detekovatelné, nicméně přece jen lze pozorovat určité vibrace okolo 2400m. Pro lepší představu je vhodné zajímavý úsek přiblížit viz. Obr. 3.18. Nyní jsou již vibrace, odpovídající přejíždění či brnkání prstem po vlákně, viditelné velmi dobře. Filtr založen na bázi plovoucího průměru demonstruje dobrý nástroj pro detekci významných událostí. Největší výhodou filtru je jeho rychlost, kdy doba zpracování $2 \cdot 10^7$ hodnot činila zhruba 0,36s.

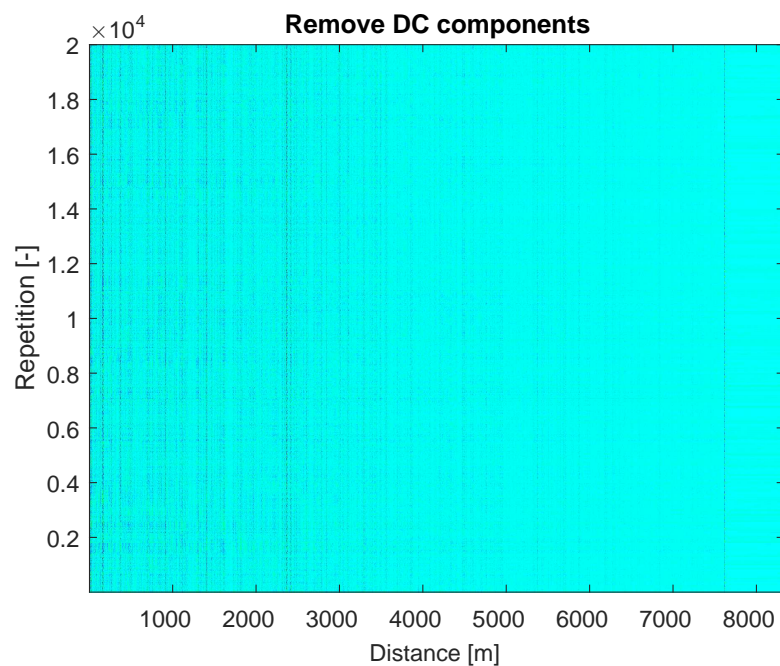


Obr. 3.18: Odečtení náměrů od plovoucího průměru

3.4.2 Odstranění stejnosměrné složky

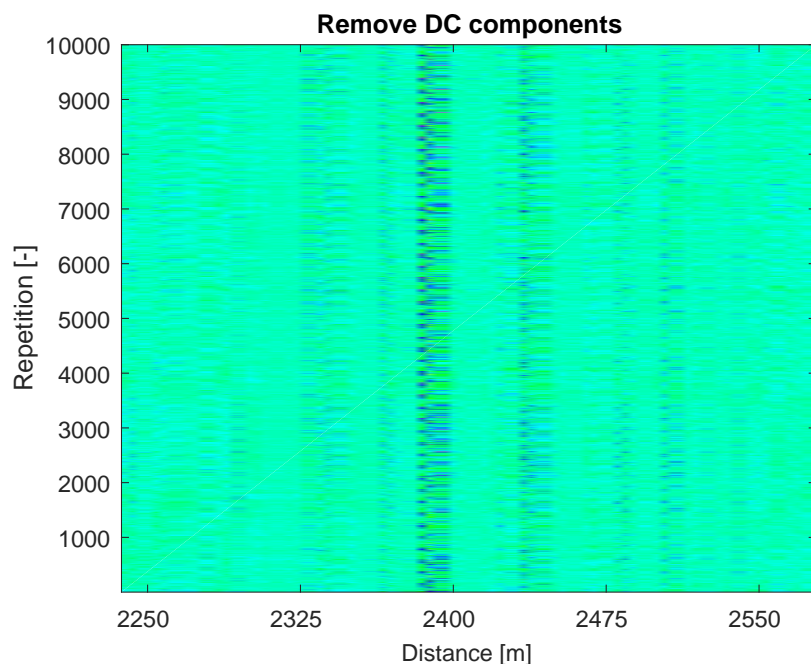
Vzhledem k tomu, že ve vlákně dochází v různých místech k odrazům i bez vibrací, je v průměru příliš mnoho maximálních hodnot. Avšak je žádoucí, aby tyto odrazy bez relevantní informace měly konstantní hodnotu a bylo je tedy možno zanedbat. Toho lze dosáhnout odstraněním stejnosměrné složky. Zanedbáním stejnosměrné složky je prakticky myšleno odstranění průměrů z náměrů. Samotný průměr může být vypočítán i za pomoci průměru plovoucího, a to volbou nadměrně velkého plovoucího okna viz. výše. Výsledek rozdílů náměrů a spočítaných průměrů je pak zobrazen na Obr. 3.19.

I zde, podobně jako u plovoucího průměru, je možnost pozorovat rušení okolo 2400m. Na druhou stranu významné události po odstranění stejnosměrné složky nejsou tak dobře viditelné jako v předchozím případě.



Obr. 3.19: Odstranění stejnosměrné složky

Opět je, pro lepší představu, vhodné výsledky filtru přiblížit, jak je tomu na Obr. 3.20. Zachycené rušení je i teď pozorovatelné pouhým okem. Kvalitou lze filtr, založen na principu odstranění stejnosměrné složky, přirovnat k předchozímu filtru na bázi plo-
voucího průměru, a to i co se týče rychlosti, kdy zpracování stejného počtu dat trvalo 0,25s.



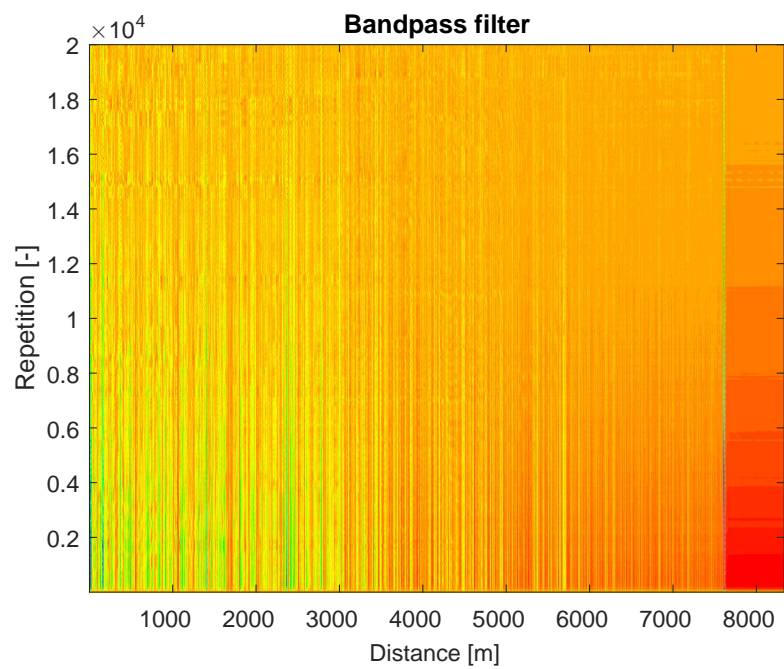
Obr. 3.20: Odstranění stejnosměrné složky

3.4.3 Filtrování pásmovou propustí

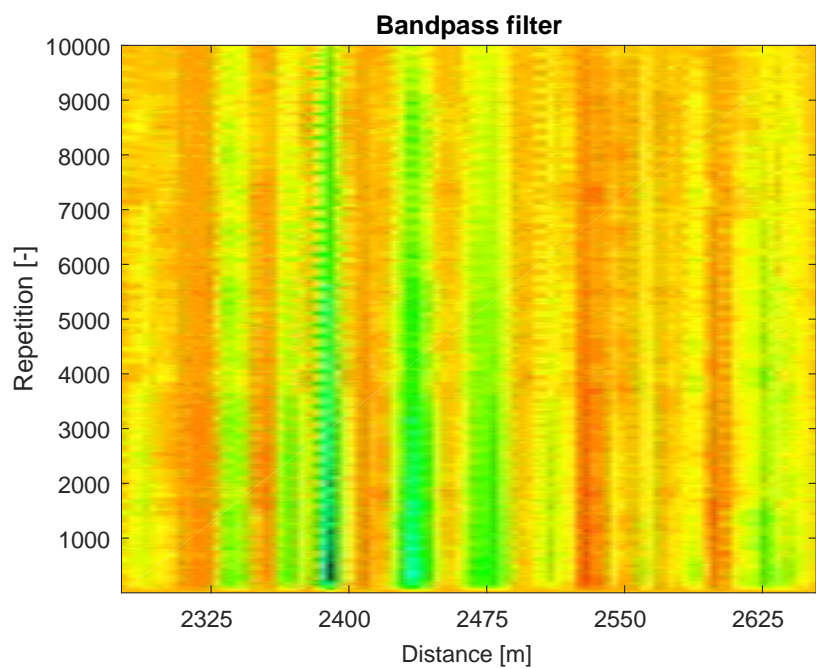
Třetí možností, jak redukovat šum, představuje pásmová propust. Tento filtr je založen na kombinaci horní a dolní propusti, přičemž je možné nastavovat obě frekvenční meze. Rozdíl těchto frekvencí pak udává šířku propustného pásma. Pro demonstraci vlivu pásmové propusti na měřená data byl vybrán Butterworthův filtr, což je nejčastěji používanější filtr v regulační technice. U Butterworthova filtru se vychází ze skutečnosti, že frekvenční odezva je v průchodovém pásmu maximálně plochá.

Pro redukci šumu byl použit filtr prvního řádu, následně byl zvolen vzorkovací kmitočet 10kHz. Dolní mez frekvence byla volena 0.2Hz a horní mez 20Hz. Na Obr. 3.21 je okolo 2500m vidět nějaká neobvyklá aktivita. Tuto aktivitu je vhodné přiblížit, jak ukazuje Obr. 3.22.

Zachycené vibrace, znázorňující přejíždění prstů po vlákne, jsou o něco méně detekovatelné, než v předchozích dvou případech, přičemž doba vyfiltrování dat byla stanovena na 1,4s.



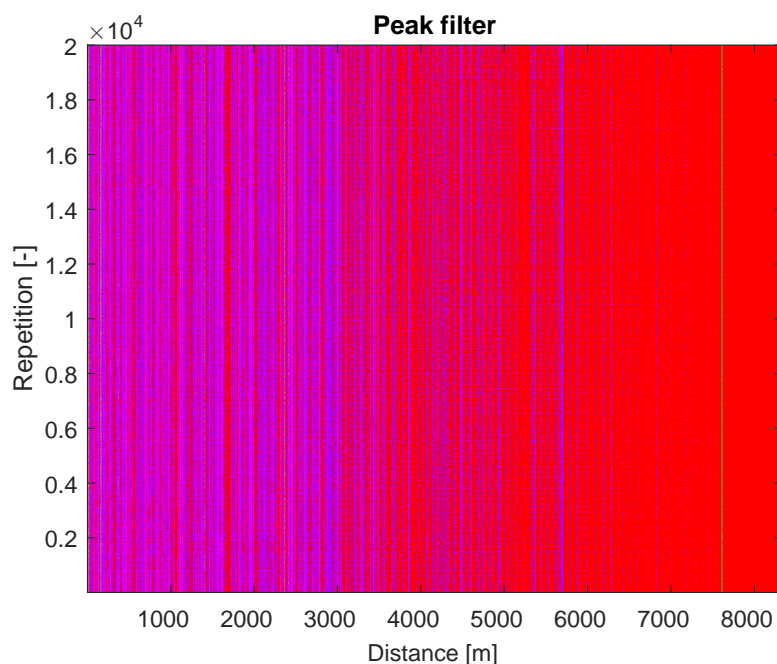
Obr. 3.21: Bandpass filter



Obr. 3.22: Bandpass filter

3.4.4 Filtrace špiček

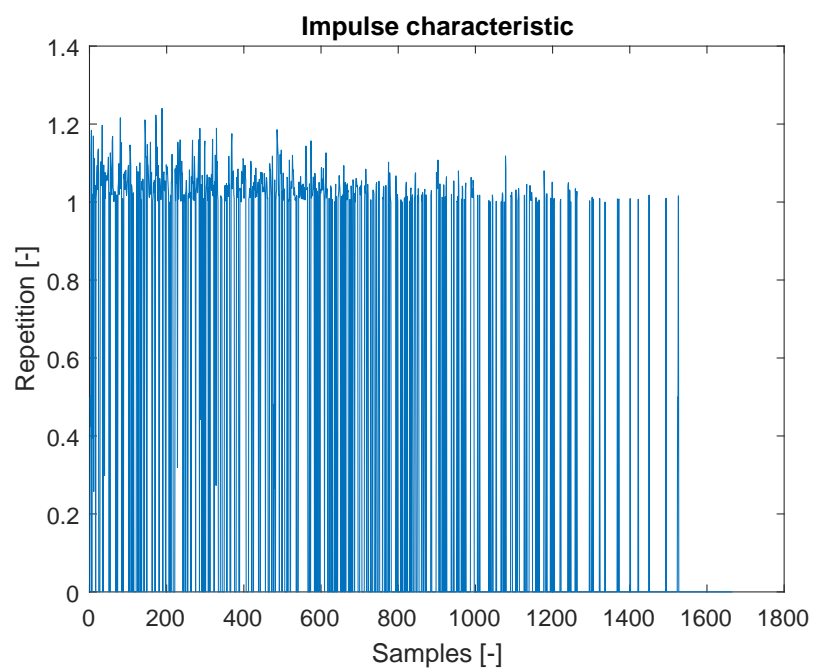
Při pozorování impulzních charakteristik Obr. 3.11 je vidět, že největších hodnot dosahují špičky pro začátek a konec vlákna. Nicméně tyto špičky nejsou žádoucí, poněvadž při vykreslení utlumují eventuální významné události. Proto je vhodné tyto špičky eliminovat. K tomuto účelu byl navržen matematický filtr, který označené špičky odstraňuje a naopak možné významné události zesiluje tak, aby byly co nejlépe pozorovatelné. Výsledek takového filtru je na Obr. 3.23.



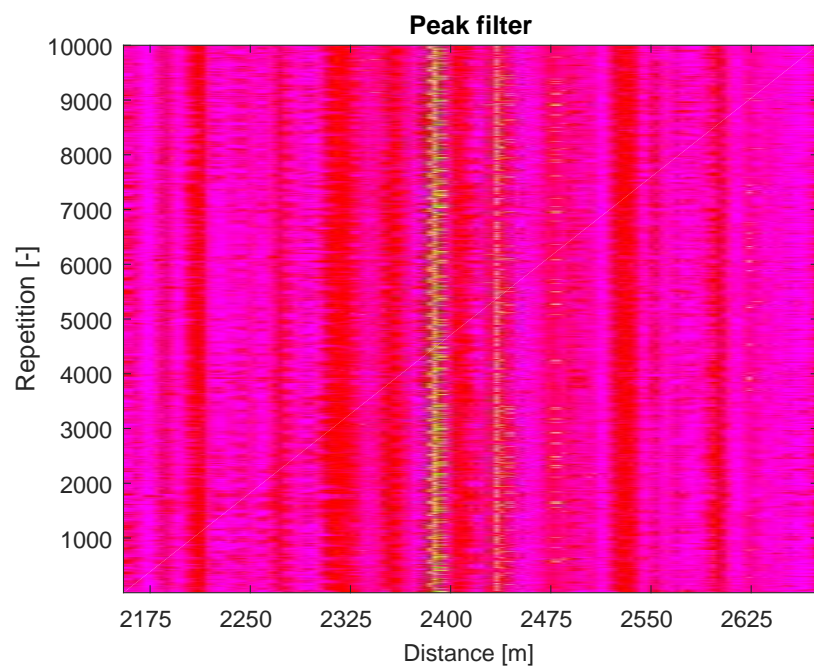
Obr. 3.23: Filtrace špiček

Pro kontrolu správnosti filtru je vhodné podívat se na impulzní charakteristiku filtrovaných dat viz. Obr. 3.24. Je zřejmé, že nežádoucí špičky byly odstraněny a relevantní informace naopak zesílena. Za povšimnutí stojí i záporné hodnoty, které byly v rámci filtru vynulovány tak, aby se náměry nacházely v kladných hodnotách.

Mohlo by se zdát, že filtr na Obr. 3.23 nevykazuje žádnou užitečnou informaci, avšak po přiblížení Obr. 3.25 je evidentní, že filtr založen na odstranění nežádoucích špiček dosáhl, v porovnání s předchozími filtry, nejlepších výsledků, kdy jsou vibrace nezpochybnitelně detekovány. Na zpracování dat bylo třeba 0.91s času, což činí z filtru špiček jeden z nejlepších nástrojů pro detekci zajímavých oblastí.



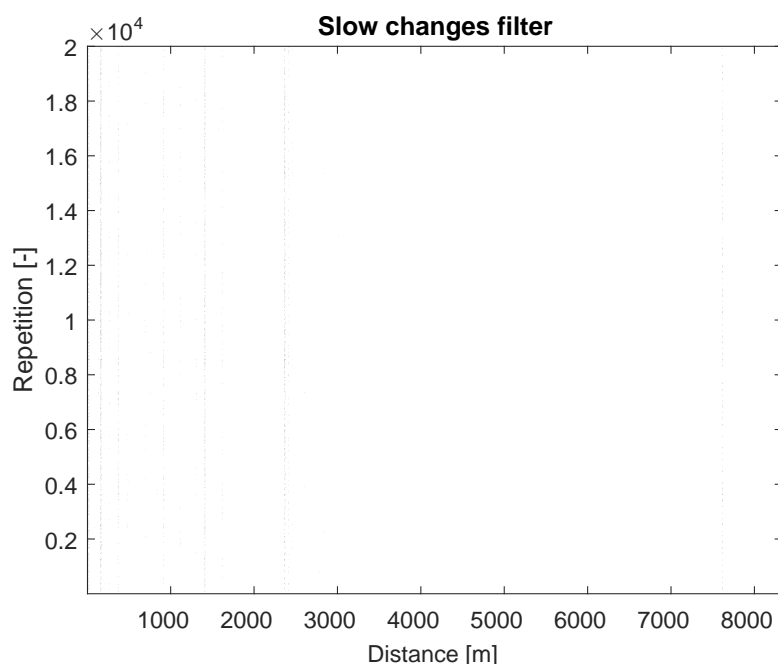
Obr. 3.24: Impulzní charakteristika filtru špiček



Obr. 3.25: Filtrace špiček

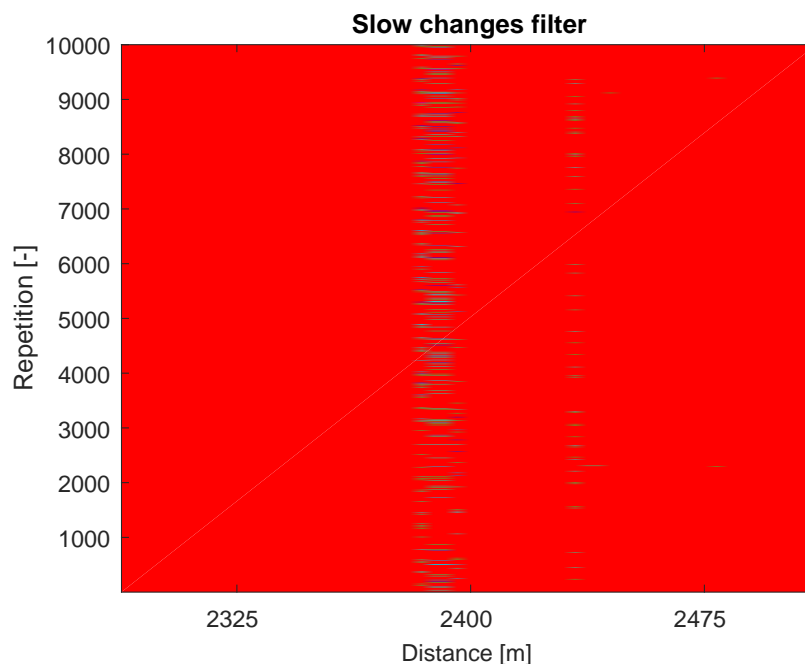
3.4.5 Eliminace pomalých změn

Další možností, jak zvýraznit možné události, je odfiltrovat pomalé změny. Pro představu, při zobrazení surových repetitivních seřazených pod sebe viz. Obr. 3.10, lze v grafu vidět různé odstíny jednotlivých barev. To je způsobeno velmi podobnými hodnotami odrazů zachycených v určité vzdálenosti. Pokud jsou v dané vzdálenosti hodnoty odrazů stejné či velmi podobné, jedná se o pomalé změny. Nicméně takové změny nejsou žádoucí a je nutné je odstranit. Eliminaci pomalých změn zajišťuje matematický filtr zobrazený na Obr. 3.26.



Obr. 3.26: Filtr pomalých změn

Princip filtru pomalých změn spočívá v porovnávání jednotlivých hodnot na dané vzdálenosti. Pokud činí rozdíl menší hodnotu, než udává daná mez, hodnota je vynulována. Při pohledu na Obr. 3.26 je nasnadě říci, že tento filtr není efektivní, jelikož nevykazuje z náměrů žádnou relevantní informaci. Avšak po bližším prozkoumání Obr. 3.27 a změně barevného zobrazení vynikají vibrace z náměrů. Kvalitou filtr připomíná filtraci na základě eliminace špiček, avšak filtr pomalých změn pracuje dvakrát rychleji.

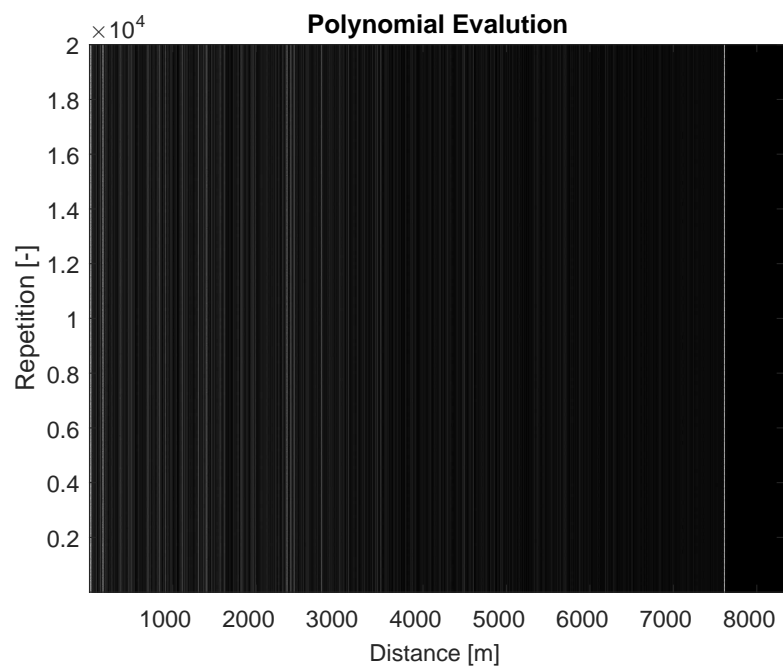


Obr. 3.27: Filtr pomalých změn

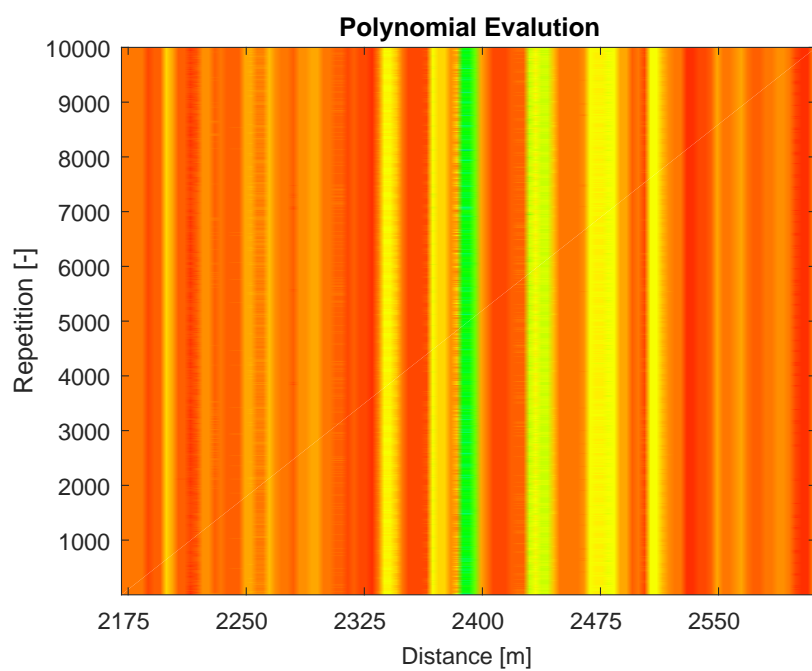
3.4.6 Hodnocení polynomu

Jako poslední byl navržen polynomický filtr, který je založen na hodnocení polynomu. Existuje celá řada operací, jež je možné definovat pro polynomy. Mezi nejzákladnější operace se řadí hodnocení polynomu. Jednou z variant hodnocení reprezentuje volení polynomu s největší výtěžností. Tato výtěžnost je určena pomocí síta, které je tvořeno každým polynomem v dané oblasti. Cílem je nalézt takový polynom, který nejvíce vyhlazuje zašumělá data. Metoda hodnocení polynomu však na velké množství dat značně zatěžuje běh celého algoritmu [25]. [26].

Filtr založený na hodnocení polynomu je znázorněn na Obr. 3.28. Jeví se jako velmi dobrá volba pro filtraci náměrů. Okolo 2,4km je pouhým okem vidět neobvyklá událost, kterou lze lépe zobrazit pomocí nástroje lupy, a změnou škály barev. Taková změna je na Obr. 3.29. Nevýhodou filtru na bázi hodnocení polynomu se ukázala být jeho rychlost, kdy zpracování $2 \cdot 10^7$ dat zabralo přibližně 460s, což z něj činí jednoznačně nejpomalejší filtr.



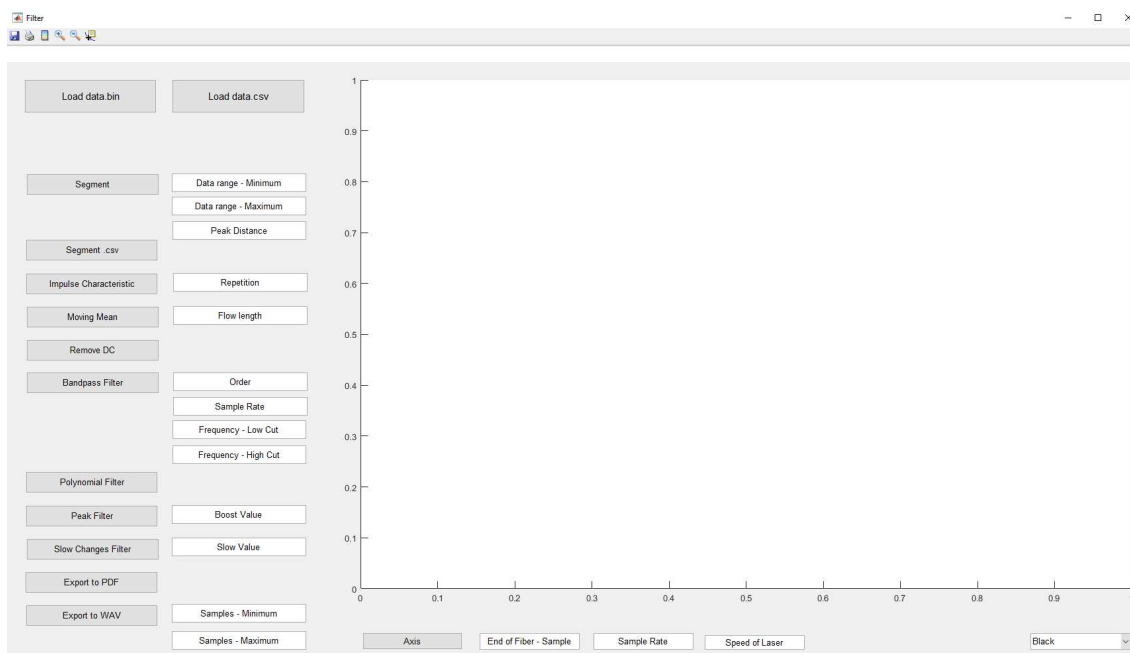
Obr. 3.28: Polynomický filtr



Obr. 3.29: Polynomický filtr

3.5 Grafické uživatelské rozhraní - GUI

V MATLABu lze všechny filtry vyjádřit jako jednotlivé funkce. Volání těchto funkcí je pak realizováno pomocí konzole, kde jsou uživatelem voleny vstupní parametry a požadovaný výstup. Takto nastavená procedura je sice funkční, avšak velmi zdoluhavá, jelikož volání jednotlivých funkcí zabere značné množství času, a také vyžaduje jistou znalost programového prostředí MATLAB. Z uvedených důvodů bylo navrženo intuitivní grafické uživatelské rozhraní (GUI), které je zobrazeno na Obr. 3.30.



Obr. 3.30: Grafické uživatelské rozhraní

GUI je rozvrženo do několika sektorů, kde horní část je věnována různým nástrojům jako je lupa, nástroj pro tisk či kurzor dat v grafu. Pod nástroji se nachází místo pro výpis cesty k načtenému souboru. Další sektor je umístěn na levé straně a obsahuje veškeré funkce pro práci s daty.

- Load data.bin – funkce pro nahrání binárního souboru získaných náměrů z jednoho kanálu, tedy jednoho vektoru, ve kterém jsou uloženy hodnoty pro pulzy vyslány do vlákna i zachycené odezvy.
- Load data.csv – nástroj pro načtení dat ze souborového formátu CSV, data tentokrát uložena do dvou vektorů, jeden pro pulzy a druhý pro odezvy.
- Segment – metoda pro segmentaci dat, přičemž je nezbytné zadat vstupní parametry, kterými jsou rozsah dat, která mají být segmentována, což je žádoucí především v případě velkého množství náměrů, např. při 100s záznamu nemusí

výkon počítače k segmentaci celého vektoru stačit. Dalším vstupní parametr pak tvoří mezera mezi jednotlivými špičkami náběžných hran vstupních pulzů.

- Segment .csv – funkce pro segmentaci dat, tentokrát pro data ze souborového formátu CSV, kdy je nastavena hlavička defaultně na 22 řádků.
- Impulse Characteristic – nástroj pro vykreslení impulzní charakteristiky jedné repetice, jejíž číslo nutno zadat jako vstupní parametr.
- Moving Mean – metoda pro výpočet plovoucího průměru. Vstupním parametrem je délka plovoucího okna.
- Remove DC – nástroj pro odstranění stejnosměrné složky. Tato funkce nemá žádný volitelný parametr.
- Bandpass Filter – filtrace pásmovou propustí, kdy uživatel nastavuje parametry Butterworthova filtru, a to řád, vzorkovací kmitočet a obě mezní frekvence.
- Polynomial Filter – filtr založený na hodnocení polynomu, kdy není uživatelem zadáván žádný vstupní parametr. Tento filtr má však velkou dobu výpočtu oproti ostatním filtrům.
- Peak Filter – metoda pro eliminaci špiček. Vstupním parametrem je volitelná mez, vůči které jsou porovnávány všechny hodnoty naměření.
- Slow Changes Filter – funkce pro odstranění pomalých změn. Definována jedním vstupním parametrem, a to mezní hodnotou, na základě které se rozhoduje o odstranění pomalých změn.

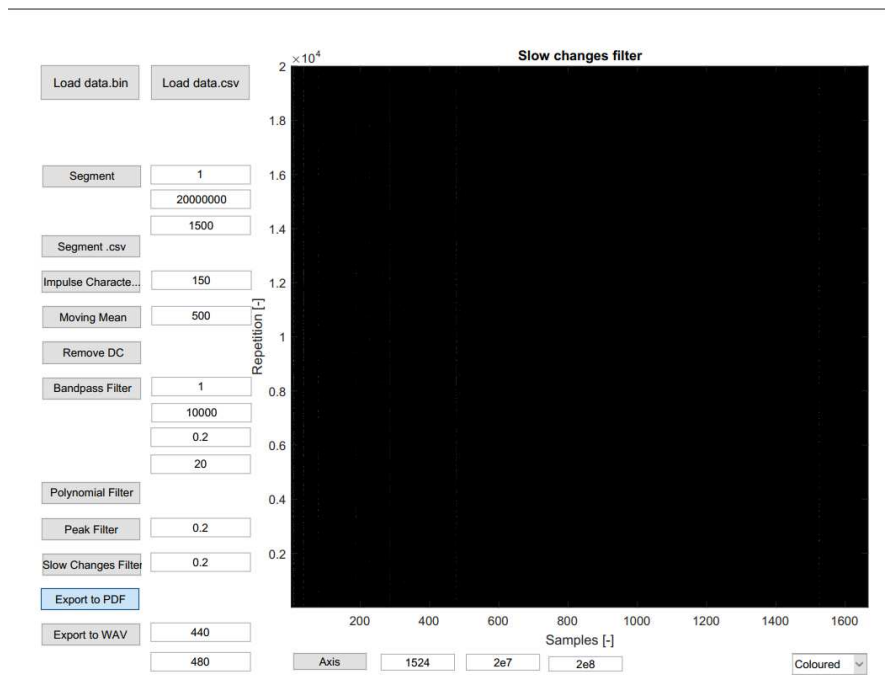
Další část GUI tvoří čtyři nástroje, z nichž dva slouží k ukládání výsledků. První možností je celé GUI uložit do PDF souboru, kde je exportován nejen graf, ale i parametry všech filtrů. Výsledek uložení je na Obr. 3.31.

Speciálním exportem je převod do souboru typu WAV. Soubor s příponou .wav představuje zvukový formát. Pro převod výsledků do audio formátu je žádoucí zadat, které naměry mají být převedeny. Prakticky se jedná o výběr výseče dat, která mají být transformována do audio souboru. Třetí funkci v tomto sektoru představuje metoda přepočtu vzorků na vzdálenost. Vstupní parametry představují samotné údaje o měření, tedy číslo vzorku, který indikuje odraz od konce vlákna, dále pak vzorkovací kmitočet a v poslední řadě rychlost šíření světla v optickém vlákne. Přepočítané naměry jsou vyobrazeny na Obr. 3.32.

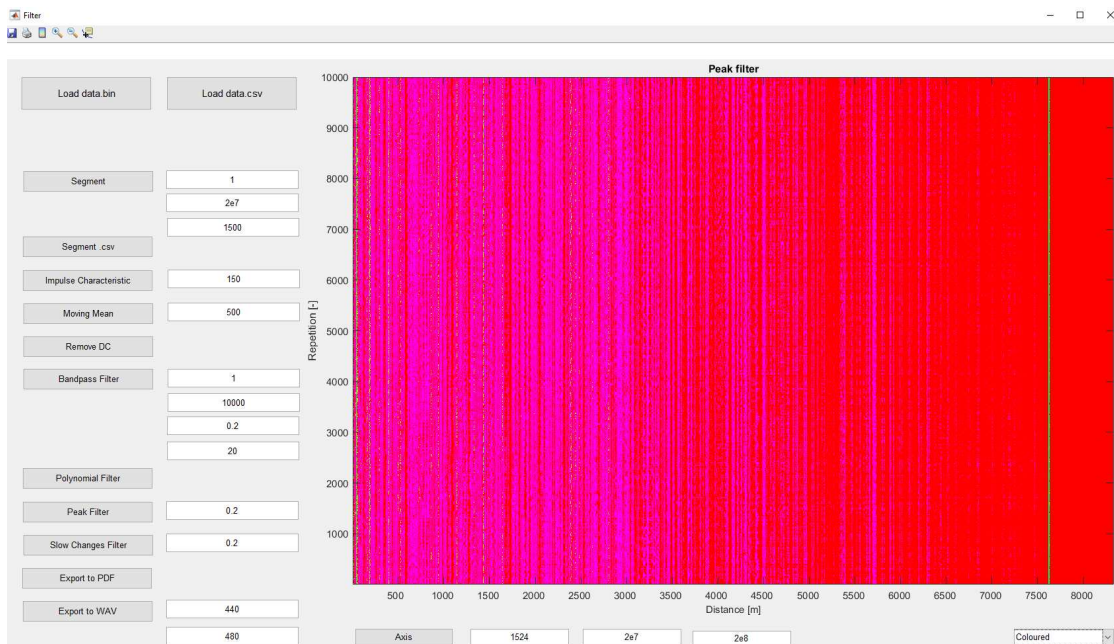
Dalším nástrojem z této nabídky je volba palety barev. Při každém použití filtrů je žádoucí shlédnout výsledek ve všech nabízených možnostech zobrazení, jelikož některé výsledky lze lépe pozorovat v kontrastu černé a bílé barvy, jiné více vyniknou v barevném provedení. Navržené GUI nabízí z výběru tři možnosti, jak je ukázáno na Obr. 3.32.

Poslední a zároveň největší část grafického uživatelského rozhraní zabírá okno grafu, ve kterém jsou vykreslovány veškeré dosažené výsledky a filtrace. Všechny

dílčí části GUI utváří dohromady jeden celek, jež poskytuje vhodný nástroj pro analýzu náměrů získaných z měřené trasy.



Obr. 3.31: Export GUI do PDF



Obr. 3.32: Náměry převedeny na vzdálenost

4 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou seismických vln, které jsou na Zemi generovány přírodními zdroji či vlivem člověka. V první polovině teoretické části práce jsou uvedeny vlastnosti seismických vln, jejich typy a původ, zejména je vyzdvíženo zemětřesení, které se řadí mezi největší přírodní generátory. Následně jsou popsány hlavní oblasti seismické aktivity v České republice. Zbylá část teorie je věnována problematice měření seismických vln. Jsou zde detailně rozebrány jednotlivé druhy snímačů. Důraz je kladen především na jejich principy, výhody a nevýhody. Z těchto senzorů jsou v současné době nejvíce využívány systémy založené na principu fázového optického reflektometru a distribuovaného akustického snímače.

Praktická část práce je zaměřena na analýzu seismických vln, konkrétněji na metody pro redukci šumu a zvýraznění významných událostí v měřených datech. Nejdříve je popsáno zapojení, které bylo použito pro náměr testovacích dat, která jsou poté popsána. Během měření byly manuálně generovány vibrace a to přejížděním prstů po optickém vlákne, které tvořilo danou trasu. Získaná data neboli náměry, byla ukládána na pevný disk ve dvou typech a to souborovém formátu CSV a binárním souboru. Pro oba formáty byla implementována funkce pro rozdělení náměrů do požadované podoby, což dovolilo náměry dále analyzovat pomocí metod k tomu určených. První implementovanou metodu představuje filtr na bázi plovoucího průměru, kde byl představen princip a též riziko při volbě nepřiměřeně velkého plovoucího okna. Poté byl prezentován vliv tohoto filtru na měřená data a určena doba nutná k výpočtu. Po plovoucím průměru následovala další metoda, a to odstranění stejnosměrné složky. Odstranění stejnosměrné složky funguje v principu velmi podobně, čemuž nasvědčovaly i výsledky působení této metody na náměry. Třetí představenou metodu tvořila pásmová propust, která tvoří vhodnou volbu pro analýzu seismické aktivity vzhledem k možnosti filtrování různých frekvencí a dobou, potřebnou pro filtrování dat. Jako další byl navržen filtr pro eliminaci nežádoucím špiček. Nežádoucími špičkami jsou myšleny odrazy od začátku a konce vlákna, které svou hodnotou utlumují jiné odrazy. Tento filtr je svou rychlostí a schopností zdůraznit významné události, právem považován jako jeden z nejefektivnějších způsobů filtrace měřených dat. Následující, v pořadí již pátou metodou, byl implementován filtr pomalých změn. Pomalé změny nejsou v náměrech žádoucí, jelikož nepředstavují žádnou relevantní informaci. Metoda použitá pro filtraci pomalých změn se jeví, společně s filtrem založeným na eliminaci špiček, jako nejlepší volba pro redukci šumu a zvýraznění hledaných vibrací. Posledním filtrem je metoda založená na hodnocení polynomu, která rovněž prokázala dobré výsledky, avšak doba potřebná k výpočtu byla několikanásobně vyšší, než u ostatních filtrů.

V poslední řadě bylo navrženo přehledné grafické uživatelské rozhraní, do kterého byly všechny metody implementovány. Rozhraní obsahuje spoustu nástrojů k lepší detekci vibrací. Jednotlivé výsledky pak mohou být exportovány do PDF souboru či formátu zvuku, lze si je tedy přehrát na kterémkoliv hudebním přehrávači.

LITERATURA

- [1] BALDWIN, Christopher S., Gary PICKRELL, Henry H. DU, Metin AKTAS, Toygar AKGUN, Mehmet Umut DEMIRCIN a Duygu BU-YUKAYDIN. *Deep learning based multi-threat classification for phase-OTDR fiber optic distributed acoustic sensing applications* [online]., 18 [cit. 2017-12-13]. DOI: 10.1117/12.2262108. ISBN 10.1117/12.2262108. Dostupné z: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2262108>>.
- [2] ZHANG, Yan, Sanguo LI, Z. YIN, Robert PASTORE, JR., Kurt O'DONNELL, Michael PELLICANO, John KOSINSKI a Hong-Liang CUI. *Fiber Bragg grating sensors for seismic wave detection* [online]., 4 [cit. 2017-12-13]. DOI: 10.1117/12.623728. ISBN 10.1117/12.623728. Dostupné z: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.623728>>.
- [3] CHAKRABORTY, Avijit a David OKAYA. *Frequency-time decomposition of seismic data using wavelet-based methods* [online]., 11 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <<https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.1443922>>.
- [4] NAUDI, Daniele. *SOFO Sensors for Static and Dynamic Measurements* [online]., 10 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <https://www.fig.net/nottingham/proc/ts_06_2_inaudi.pdf>.
- [5] PARKER, Tom, Sergey SHATALIN a Mahmoud FARHADIROUSHAN. *Distributed Acoustic Sensing – a new tool for seismic applications* [online]., 9 [cit. 2017-12-13]. DOI: 10.3997/1365-2397.2013034. ISBN 10.3997/1365-2397.2013034. Dostupné z: <<http://fb.eage.org/publication/content?id=73487>>.
- [6] PILHAN, Kim, Yoon HOSUNG, Seo JAE-EUN, Jeong KITAE, Ryoo KI-WON, Lee KYU-HAENG a Park NAMKYOO. *Novel In-Service Supervisory System Using OTDR for Long-Haul WDM Transmission Link Including Cascaded In-Line EDFAs* [online]., 3 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/950760/>>.
- [7] LIOKUMOVICH, Leonid B., Nikolai A. USHAKOV, Oleg I. KOTOV, Mikhail A. BISYARIN a Arthur H. HARTOG. *Fundamentals of Optical Fiber Sensing Schemes Based on Coherent Optical Time Domain Reflectometry: Signal Model Under Static Fiber Conditions* [online]., 11 [cit. 2017-12-13].

- DOI: 10.1109/JLT.2015.2449085. ISBN 10.1109/JLT.2015.2449085. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7131435/>>.
- [8] YIN, Shizhuo, Paul B. RUFFIN a Francis T. S. YU. *Fiber Optic Sensors: Second Edition*. CRC Press. ISBN 9781420053654.
 - [9] CONWAY, Chris a Michael MONDANOS. *An introduction to fibre optic Intelligent Distributed Acoustic Sensing (iDAS) technology for power industry applications* [online]., 6 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <<https://goo.gl/EjANcV>>.
 - [10] HRBATOVÁ, Jitka. *Fyzika a Geografie*. 2010. Diplomová práce. PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI. Dostupné z: <<https://theses.cz/id/xm5acm/75240-109882297.pdf>>.
 - [11] KALÁB, Zdeněk a Markéta LEDNICKÁ. *Teorie vzniku a šíření seizmických vln* [online]. In: . s. 29 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <<http://home1.vsb.cz/~pin078/T0JU/prednaska10c.pdf>>.
 - [12] TOIGO, Enrico. *DEVELOPMENT OF A FIBRE OPTIC DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSOR*. 2016. Master thesis in Telecommunication Engineering. UNIVERSITY OF PADOVA.
 - [13] KOUBOVÁ, Hana. *Využití mělkého refrakčního a reflexního seizmického profilování v geologii*. 2012. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Dostupné z: <https://theses.cz/id/wr7cl8/Bakalsk_prce_-_Hana_Koubov.pdf>.
 - [14] KRÍŽEK, Marek. *Zemětřesení na území České republiky* [online]., 2 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <<http://geography.cz/geograficke-rozhledy/wp-content/uploads/2007/12/str4-5.pdf>>.
 - [15] MEIQI, Ren. *Distributed Optical Fiber Vibration Sensor Based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry*. 2016. University of Ottawa. Dostupné z: <https://ruor.uottawa.ca/bitstream/10393/34400/1/Ren_Meiqi_2016_thesis.pdf>.
 - [16] KENNETH, Brian. *Seismic wave propagation in stratified media* [online]. New ed. Acton, A.C.T: ANU E Press, 2009 [cit. 2017-12-13]. ISBN 978-192-1536-731. Dostupné z: <<http://www.oapen.org/search?identifier=459524>>.
 - [17] Zemětřesení. *Přírodní katastrofy a environmentální hazardy* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <<http://www.sci.muni.cz/~herber/quake.htm>>.

- [18] Fiber Bragg Grating (FBG) Sensor Principle. *FBGS* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <<http://www.fbgs.com/technology/fbg-principle/>>.
- [19] Fundamentals of Fiber Bragg Grating (FBG) Optical Sensing. *NATIONAL INSTRUMENTS* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <<http://www.ni.com/white-paper/11821/en/>>.
- [20] Deformation Monitoring with Fiber Optic Sensors (SOFO V). *IIC's Activities for Ensuring the Reliability of Industry and the Safety and Society* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <<http://www.iic-hq.co.jp/english/03sp/01ii/02is/KK-03.html>>.
- [21] MACHAČ, Václav. *Sopečná činnost a zemětřesení v České republice* [online]. , 20 [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <<http://www.gjs.cz/vedy-o-zemi/prace/rocnikove-prace/machacv.pdf>>.
- [22] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku* Doc. Ing. Miloslav Filka. ISBN 9788086785141.
- [23] MURPHY, Casey. *Moving Averages: What Are They?* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <<https://www.investopedia.com/university/movingaverage/movingaverages1.asp>>.
- [24] ERIC, Weisstein. *Moving Average* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <<http://mathworld.wolfram.com/MovingAverage.html>>.
- [25] YAN-BIN, Jia. *Polynomial Evaluation* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <<http://web.cs.iastate.edu/~cs577/handouts/polyeval.pdf>>.
- [26] PEJLOVÁ, Anežka. *Generování polynomů pro číselné síto*. Praha, 2016. DIPLOMOVÁ PRÁCE. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Prof. RNDr. Aleš Drápal, CSc., DSc.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

OTDR	Optický reflektometr
EOM	Externí Elektrooptický Modulátor
Φ -OTDR	Fázový Optický Reflektometr
DAS	Distribuovaný Akustický Snímač
iDAS	inteligentní Distribuovaný Akustický Snímač
AOM	Akustický Optický Modulátor
FBG	Fiber Bragg Grating – Optická Braggova Mřížka
SOFO	Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques – Systém pro kontrolu struktur pomocí optických vláken
SMA	Simple Moving Average – Jednoduchý plovoucí průměr
EMA	Exponential Moving Average – Exponenciální plovoucí průměr
GUI	Graphic user interface – Grafické uživatelské rozhraní